



저작자표시-비영리-변경금지 2.0 대한민국

이용자는 아래의 조건을 따르는 경우에 한하여 자유롭게

- 이 저작물을 복제, 배포, 전송, 전시, 공연 및 방송할 수 있습니다.

다음과 같은 조건을 따라야 합니다:



저작자표시. 귀하는 원저작자를 표시하여야 합니다.



비영리. 귀하는 이 저작물을 영리 목적으로 이용할 수 없습니다.



변경금지. 귀하는 이 저작물을 개작, 변형 또는 가공할 수 없습니다.

- 귀하는, 이 저작물의 재이용이나 배포의 경우, 이 저작물에 적용된 이용허락조건을 명확하게 나타내어야 합니다.
- 저작권자로부터 별도의 허가를 받으면 이러한 조건들은 적용되지 않습니다.

저작권법에 따른 이용자의 권리는 위의 내용에 의하여 영향을 받지 않습니다.

이것은 [이용허락규약\(Legal Code\)](#)을 이해하기 쉽게 요약한 것입니다.

[Disclaimer](#)

공학박사학위논문

회전형 필터 및 가변 조리개를 이용한
이미징 분광 반사계의 파장 분해능 개선

**Improvement of wavelength resolution in
Imaging Spectroscopic Reflectometer using
rotating-type filter and tunable aperture**

2018 년 2 월

서울대학교 대학원
기계항공공학부
김민갑

국문 초록

반도체 및 디스플레이 제조 공정이 고도로 발달함에 따라 최근의 공정에서는 국소 영역별로 두께가 다른 미세 박막 패턴 형상에 대한 두께 측정이 요구된다. 기존에 투명 박막의 두께 형상 측정에 널리 사용되는 이미징 분광 반사계는 시스템 구성에 따라 강건성이 떨어져 양산 장비에 사용되지 못하거나 파장 분해능이 낮아 측정 성능이 좋지 못한 한계가 있다. 이에 본 연구에서는 회전형 필터 및 가변 조리개를 이용한 다중 반사도 중첩법을 제안하여 강건성과 파장 분해능을 두루 갖춘 이미징 분광 반사계 시스템을 구성하는데 그 목표가 있다.

모의 실험을 통해 파장 분해능에 따른 측정 성능을 평가하여 기존의 이미징 분광 반사계 시스템이 갖는 한계를 분석하고, 파장 분해능을 개선하기 위한 목적으로 다중 반사도 중첩법을 제안하였다. 가변 조리개를 이용하여 서로 다른 입사각을 갖도록 유도된 다중 반사도 신호를 중첩하는 방법으로 파장 분해능을 개선시킬 수 있음을 보였다.

다중 반사도 중첩법의 도입이 측정 성능에 미치는 영향을 평가하는 실험을 수행하였다. 모의 실험을 통해 결정된 입사각을 유도하기 위한 가변 조리개를 적절하게 설계하고 이를 이미징 분광 반사계에 적용하여 시스템을 구성하였다. 다양한 시편에 대해 제안된 방법을 적용함으로써 파장 분해능이 개선된 결과를 얻을 수 있었고 측정 성능이 수치적으로 향상되는 것을 바탕으로 제안된 방법의 효용성을 확인하였다.

주요어: 박막, 두께 형상 측정, 이미징 분광 반사계, 회전형 필터, 가변 조리개, 다중 반사도 중첩법,

목차

국문 초록	II
그림 목차	iii
기호 설명	viii
약어 설명	ix
1. 서론	1
1.1. 연구 배경	1
1.2. 선행 연구 동향	4
1.3. 연구 내용	12
2. 배경 이론	13
2.1. 파장 별 반사도 신호의 수학적 표현	13
2.2. 박막 두께 측정 방법	21
2.3. 분광 반사계 시스템	30
3. 광원 필터링 시스템	35
3.1. 개요	35
3.2. 음향 광학 변조 필터	36
3.3. 회전형 필터	38
3.4. 파장 분해능의 영향	40
4. 다중 반사도 중첩법	51
4.1. 개요	51
4.2. 다중 반사도 중첩법을 이용한 파장 분해능 개선	53
4.3. 모의 실험을 통한 시스템 최적화	71
5. 이미징 분광 반사계 시스템 구성	77
5.1. 개요	77
5.2. 광원	79

5.3 광학계 및 대물렌즈.....	80
5.4 CCD 카메라.....	81
5.5 회전형 필터.....	82
5.6 가변 조리개.....	83
6. 실험.....	84
6.1. 개요.....	84
6.2. 다중 반사도 신호 중첩에 따른 파장 분해능 개선.....	85
6.3. 파장 분해능에 따른 반복도 평가.....	95
6.4. 파장 분해능에 따른 후막 두께 측정 성능 평가.....	98
7. 결론.....	103
References.....	105
Appendices.....	112
A. 총 반사계수의 유도.....	112
B 빛의 편광 상태에 따른 반사계수.....	114
Abstract.....	117

그림 목차

<그림 1.1 분광기를 이용한 박막 두께 측정 장치>	3
<그림 1.2 반도체의 화학적 기계 연마 공정>	3
<그림 1.3 OLED 디스플레이의 구조>	3
<그림 1.4 WLSI 장치 구성>	7
<그림 1.5 DWLI 장치 구성(U. Schnell, 1996)>	7
<그림 1.6 분광 반사계의 장치 구성>	9
<그림 1.7 이미징 분광 타원계의 장치 구성(C.-Y. Han, 2006)>	11
<그림 2.1 박막 물질에서의 빛의 다중 반사>	14
<그림 2.2 서로 다른 매질 경계에서의 빛의 반사와 굴절>	15
<그림 2.3 빛의 편광 상태에 따른 P파와 S파의 구분>	17
<그림 2.4 모델링된 파장 별 반사도 (SiO_2 1000nm)>	20
<그림 2.5 피선형 피팅법을 이용한 박막 두께 측정>	23
<그림 2.6 AOTF 를 이용한 파장주사 간섭계 (D. Kim, 2002)>	23
<그림 2.7 피크 검출법을 이용한 박막 두께 측정 (D. Kim, 2002)>	25
<그림 2.8 웨이블릿 변환 위상 복원법 (T.-Y. Jo, 2013)>	27
<그림 2.9 위상 추출법을 이용한 두께 측정 (K. R. Kim, 2015)>	27
<그림 2.10 분광 반사계 시스템 구성>	327
<그림 2.11 스펙트로미터 내부 구조 및 반사도 신호 획득 >	327
<그림 2.12 이미징 분광 반사계 시스템 구성>	34
<그림 2.13 이미징 분광 반사계에서의 반사도 신호 획득 >	34

<그림 3.1 음향 광학 변조 필터의 구조 >.....	37
<그림 3.2 회전형 필터의 구조>	39
<그림 3.3 모델링된 반사도 신호 (SiO ₂ 1000nm 1nm interval)>.....	41
<그림 3.4 모델링된 반사도 신호 (SiO ₂ 1000nm 10nm interval)>	41
<그림 3.5 모델링된 반사도 신호 (SiO ₂ 500nm)>.....	43
<그림 3.6 모델링된 반사도 신호 (SiO ₂ 1500nm)>	43
<그림 3.7 모델링된 반사도 신호 (SiO ₂ 2500nm)>	44
<그림 3.8 모델링된 반사도 신호 (SiO ₂ 2500nm 2.5nm interval)>	44
<그림 3.9 모델링된 반사도 신호 (SiO ₂ 2500nm 5nm interval)>.....	45
<그림 3.10 모델링된 반사도 신호 (SiO ₂ 2500nm 10nm interval)>	45
<그림 3.11 반사도 신호의 비교 (SiO ₂ 2500nm)>.....	46
<그림 3.12 CCD 카메라의 내부 구조>.....	49
<그림 3.13 반복 측정 시 획득된 반사도 신호 중첩>	49
<그림 3.14 파장 분해능에 따른 반복도 모의 실험>.....	50
<그림 4.1 다중 반사도 중첩법의 순서도>.....	52
<그림 4.2 입사각에 따른 총 반사 계수의 크기 (SiO ₂ 1000 nm)>	57
<그림 4.3 입사각에 따른 총 반사 계수의 위상 (SiO ₂ 1000 nm)>	57
<그림 4.4 <그림 4.2> 의 점선 표시 영역 확대>	58
<그림 4.5 <그림 4.3> 의 점선 표시 영역 확대>	58
<그림 4.6 총 반사 계수의 위상을 이용하여 구해진 파장 측 오프셋>	59
<그림 4.7 파장 측 오프셋이 적용되어 중첩된 반사도 신호>	59
<그림 4.8 입사각에 따른 총 반사 계수의 크기 (10 nm interval)>	60
<그림 4.9 입사각에 따른 총 반사 계수의 위상 (10 nm interval)>	60
<그림 4.10 <그림 4.8> 의 점선 표시 영역 확대>.....	61

<그림 4.11 위상을 이용하여 구해진 파장 축 오프셋 (10 nm interval)>	61
<그림 4.12 파장 축 오프셋이 적용되어 중첩된 반사도 신호 (10 nm interval)>.....	62
<그림 4.13 대물 렌즈를 통과하여 입사되는 광원>	65
<그림 4.14 등가 입사각의 개념>.....	65
<그림 4.15 등가 입사각 산출>.....	66
<그림 4.16 조리개를 이용한 입사각 조절>	66
<그림 4.17 가변 조리개의 설계>.....	67
<그림 4.18 파장 축 오프셋과 입사각 간의 관계>.....	67
<그림 4.19 파장 별 파장 축 오프셋>.....	69
<그림 4.20 기존 이미징 분광 반사계 시스템에서 얻어지는 파장 분해능>.....	69
<그림 4.21 다중 반사도 중첩법에 의해 개선된 파장 분해능>	70
<그림 4.22 모의 실험을 위해 노이즈가 추가된 반사도 신호 (두께 100 nm)>.....	72
<그림 4.23 모의 실험을 위해 노이즈가 추가된 반사도 신호 (두께 200 nm)>.....	73
<그림 4.24 모의 실험을 위해 노이즈가 추가된 반사도 신호 (두께 500 nm)>.....	74
<그림 4.25 모의 실험을 위해 노이즈가 추가된 반사도 신호 (두께 1000 nm)>	75
<그림 4.26 파장 분해능에 따른 반복도 모의 실험 결과>	76

<그림 5.1 이미징 분광 반사계 시스템의 구성도>	78
<그림 5.2 실험에 사용된 LED 광원의 스펙트럼>	79
<그림 5.3 실험에 사용된 회전형 필터 구성도>.....	82
<그림 5.4 실험에 사용된 가변 조리개>	83
<그림 6.1 모의 실험 결과를 반영한 다중 반사도 신호 구성>	87
<그림 6.2 다중 반사도 신호 획득을 위한 가변 조리개 설계>	87
<그림 6.3 가변 조리개를 이용하여 획득된 다중 반사도 신호 (두께 100 nm)>.....	88
<그림 6.4 중첩된 다중 반사도 신호 (두께 100 nm)>	89
<그림 6.5 다중 반사도 신호를 통합한 최종 반사도 신호 (두께 100 nm)>.....	89
<그림 6.6 가변 조리개를 이용하여 획득된 다중 반사도 신호 (두께 200 nm)>.....	90
<그림 6.7 중첩된 다중 반사도 신호 (두께 200 nm)>	90
<그림 6.8 다중 반사도 신호를 통합한 최종 반사도 신호 (두께 200 nm)>.....	91
<그림 6.9 가변 조리개를 이용하여 획득된 다중 반사도 신호 (두께 500 nm)>.....	91
<그림 6.10 중첩된 다중 반사도 신호 (두께 500 nm)>	92
<그림 6.11 다중 반사도 신호를 통합한 최종 반사도 신호 (두께 500 nm)>.....	92
<그림 6.12 가변 조리개를 이용하여 획득된 다중 반사도 신호 (두께 1000 nm)>	93
<그림 6.13 중첩된 다중 반사도 신호 (두께 1000 nm)>.....	93

<그림 6. 14 다중 반사도 신호를 통합한 최종 반사도 신호 (두께 1000 nm)>	94
<그림 6. 15 다중 반사도 선정에 따른 파장 분해능 구성>	96
<그림 6. 16 모델링된 반사도 신호 (PR 4100nm)>	99
<그림 6. 17 PR 4100nm 시편 측정 결과 반사도 신호 (입사각 21°)> ..	99
<그림 6. 18 PR 4100nm 시편 측정 결과 반사도 신호 (입사각 19.2°)>	100
<그림 6. 19 PR 4100nm 시편 측정 결과 반사도 신호 (입사각 17.4°)>	100
<그림 6. 20 PR 4100nm 시편 측정 결과 반사도 신호 (입사각 15.3°)>	101
<그림 6. 21 PR 4100nm 시편 측정 결과 반사도 신호 (입사각 12.9°)>	101
<그림 6. 22 PR 4100nm 시편 측정 결과 반사도 신호 (입사각 12.9°)>	102
<그림 6. 23 PR 4100nm 시편 측정 결과 반사도 신호 (입사각 12.9°)>	102

기호 설명

R	Spectral reflectance
I_{inc}	Intensity of incident light
I_{ref}	Intensity of reflected light
N	Refractive index (Complex number)
n	Refraction coefficient
k	Extinction coefficient
r_{total}	Total reflection coefficient
r_{12}	Fresnel's reflection coefficient (when light goes from material 1 to material 2)
t_{12}	Fresnel's transmission coefficient (when light goes from material 1 to material 2)
λ	Light wavelength
θ_1	Incident angle
θ_2	Refraction angle in film layer
d	Film thickness
β	Phase change in film layer
a	Real part of the total reflection coefficient
b	Imaginary part of the total reflection coefficient
G	Magnitude of the total reflection coefficient
ψ	Phase of the total reflection coefficient
θ_M	Maximum incident angle
θ_{eff}	Effective incident angle

약어 설명

LCD	Liquid Crystal Display
OLED	Organic Light Emitting Diode
EML	Emission Material Layer
TFE	Thin Film Encapsulation
DWLI	Dispersive White-Light Interferometry
PDA	Photo Detector Array
CCD	Charge-Coupled Device
WSI	Wavelength Scanning Interferometry
ISR	Imaging Spectroscopic Reflectometry
LED	Light Emitting Diode
CCD	Charge-Coupled Device
SNR	Signal-to-Noise Ratio
ADC	Analog-Digital Converter
PR	Photo Resist

1. 서론

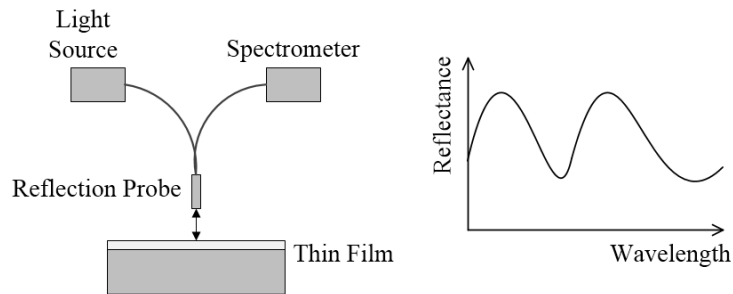
1.1. 연구 배경

최근 반도체 및 디스플레이 산업을 중심으로 제조 공정이 고도로 발달함에 따라 고품질의 제품 생산을 위해 공정 안정성 및 수율 관리가 중요한 요소가 되었다. 이를 위해 공정 개발과 더불어 안정적인 공정 관리가 가능한 높은 수준의 정밀 측정 장비의 개발 또한 요구된다.

반도체는 제품의 부피를 줄이면서 성능과 수명을 개선할 수 있는 3D 패키징 기술에 관한 많은 연구가 진행 중이다. 소자의 고집적화를 위해 제작되는 대부분의 소자들은 투명한 절연 (Passivation) 박막 (Thin film) 을 금속 패턴 위에 도포하고 이를 식각 (Etching) 하여 패턴의 형상을 제어하는 일련의 과정을 반복적으로 수행하게 된다. 이때, 각 단계마다 제작되는 패턴의 형상을 제어하는 것이 매우 중요하고, 이는 마이크로미터 (um) 이하 크기의 칩 제조에 있어 핵심 요소이다. 디스플레이는 기존의 LCD (Liquid Crystal Display) 대비 성능 및 활용도에 장점이 있는 OLED (Organic Light-Emitting Diode) 방식으로의 전환 및 고해상도화가 진행 중이다. 디스플레이 디바이스의 우수한 품질 확보를 위해서는 픽셀(Pixel) 내부 또는 전체 패널에 해당되는 면적에 대해 박막 패턴이 균일한 두께로 형성되어야 하는데 EML (Emission Material Layer), TFE (Thin Film Encapsulation) 와 같은 요소의 불균일한 두께는 화소별 휘도, 색상 등 성능 차이의 원인이 되고 소자의 수명 저하를 유발한다.

이와 같이 반도체와 디스플레이 산업에서의 미세 구조는 수많은 다층 박막으로 이루어지는데 이러한 미세 구조를 파악하기 위해서는 박막의 두께를 측정하는 기술이 필수적이다. 앞서 언급된 제품군의 일반적인 형상 특징을 살펴보면 품질 관리를 위해 요구되는 측정 단위가 얇게는 빛의 파장인 수백 나노미터 (nm) 에서 두껍게는 수십 마이크로미터에 이르기까지 광범위하다. 기존에 박막 두께를 측정하기 위해 사용되었던 대표적인 방법으로는 타원계

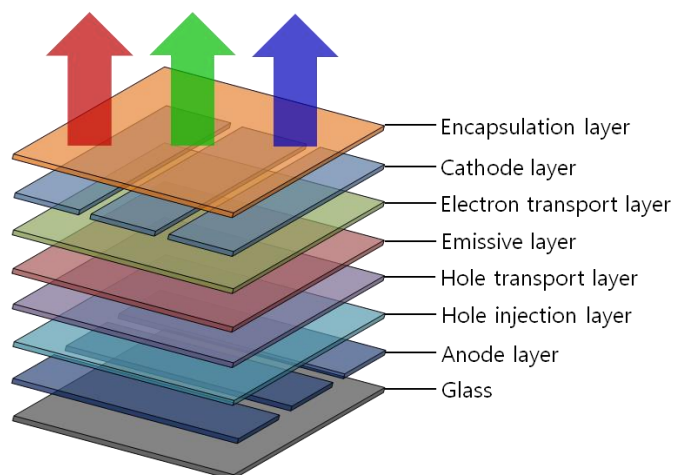
(Ellipsometer) 와 분광 반사계 (Spectroscopic reflectometer) 가 있는데 이들은 광학 비접촉식 방법으로 측정 대상에 영향을 주지 않고, 측정 분해능 또한 우수해 공정 관리 목적의 가장 적합한 수단으로 평가 받아 왔다. 하지만 최근의 공정에서는 박막의 두께가 넓은 영역에 걸쳐 균일한 것이 아니라, 특정한 미세 패턴 형상을 보이며 국소 영역별로 두께가 다른 경우가 많이 있는데 기존의 측정 방법은 측정 가능한 최소 측정 영역의 크기가 크고 한 지점의 두께만 측정 가능한 한계가 있어 미세 박막 패턴의 두께 형상을 측정하는데 어려움이 있다. 이러한 이유들로 인해 최근에는 박막 패턴의 두께 형상 측정이 가능한 이미징 분광 반사계 (Imaging spectroscopic reflectometer) 에 대한 연구가 진행되고 있다. 특히 시스템 구성이 간단해 기존의 분광 반사계의 활용이 가능하고 현미경 렌즈의 배율 조절을 통해 수백 혹은 수십 나노미터 영역의 미세 박막 패턴의 두께 형상 측정이 가능한 장점이 있어 이미징 분광 반사계에 대한 관심이 높아지고 있다.



<그림 1.1 분광기를 이용한 박막 두께 측정 장치>



<그림 1.2 반도체의 화학적 기계 연마 공정>



<그림 1.3 OLED 디스플레이의 구조>

1.2. 선행 연구 동향

1.2.1. 개요

반도체 및 디스플레이 공정에서 박막의 두께를 측정하기 위해 사용하는 여러 방법들 중 기계적인 방법, 현미경적인 방법 그리고 광학적 (optical) 인 방법이 가장 일반적이다.

기계적인 방법은 표면에 단차가 있는 박막의 두께 및 단차 형상을 측정하는 장비로 탐침 (stylus) 이 박막 표면을 긁고 지나가면 형상의 변화로부터 발생하는 압력을 감지하여 두께를 측정한다. 시료와 직접 접촉하므로 유기막은 물론 금속 박막의 두께도 쉽게 측정 가능한 장점이 있지만 접촉에 의한 시료의 파괴와 오염을 유발하고 단차의 두께만이 측정 가능하며 여러 층의 두께를 한번에 측정할 수 없는 단점이 있다.

현미경적인 방법은 단순히 일반 광학계를 이용해 육안으로 계측하는 방법과 전자현미경 또는 원자현미경을 이용하여 초고배율의 이미지를 얻어 그 두께를 측정하는 방법이 있다. 시료의 단면을 육안으로 확인할 수 있기 때문에 널리 사용되고 있으나 시료를 절단하여 측정 해야 하므로 시료의 파괴 및 많은 시간이 소요된다는 단점이 있다.

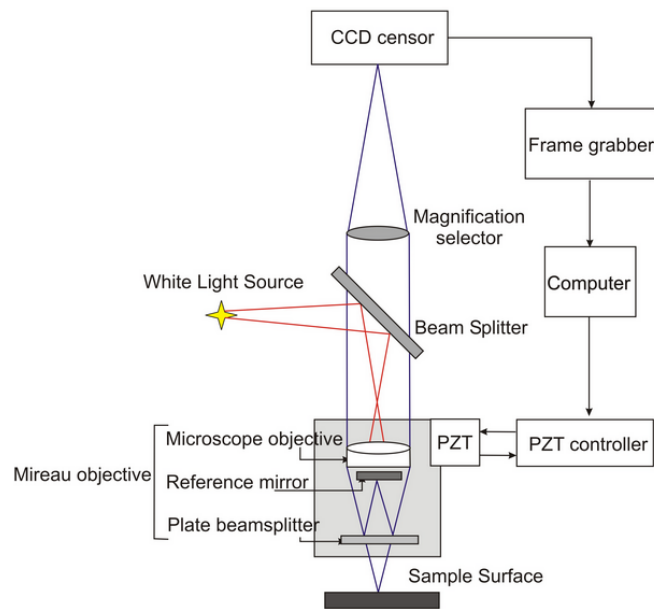
광학적인 방법은 박막 표면에서의 반사광과 하부 계면에서의 반사광의 간섭 현상 또는 빛의 위상차를 이용하여 박막의 두께를 측정하는 방법이다. 측정 대상에 손상을 주지 않으면서 극히 얇은 막에서부터 두꺼운 막까지 빠른 속도로 측정이 가능해 최근에는 두께 측정의 주류를 이루고 있는 추세이다. 백색광 간섭계, 분광 반사계, 타원계 등이 광학적인 방법에 속하며 아래와 같은 연구들이 진행되었다.

1.2.2. 백색광 간섭계

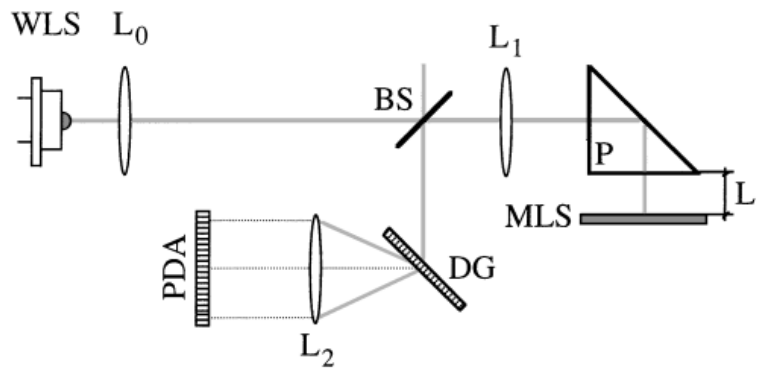
간섭계는 빛의 광경로 차이에 의해서 보강, 상쇄 간섭이 발생하는 원리를 이용하는 기술로 1966 년 P. Carre[1] 에 의해 제안되어 표면 형상 관찰을 위해 사용되었다. <그림 1.4> 는 백색광 위상 천이 간섭계 시스템의 장치 구성을 나타낸 것으로 다중 파장의 광원을 기준면과 측정면 각각에 조사한 후 미세 구동기를 이용하여 기준면을 이동시키면서 여러 장의 이미지를 획득하고 이로부터 영상 내 각 측정점에서 간섭신호의 형태와 높이와의 수학적 관계를 해석하여 표면 형상을 얻게 된다. 다중 파장으로부터 얻어지는 짧은 가간섭 거리에 의해 측정 범위에 제한이 없으면서도 위상 천이 기법을 적용하여 sub-nm의 뛰어난 분해능을 갖는다. 초기에는 단차 측정 등 표면 형상 관찰을 위해 개발되었으나 이후에는 백색광 위상 천이 간섭계를 이용하여 박막의 두께를 측정하는 알고리즘도 개발되었다[2-15]. 1999년 S. W. Kim 은 푸리에 변환을 이용하여 백색광 위상 천이 간섭계의 간섭 신호로부터 위상을 추출하고, 비선형 피팅 알고리즘을 통해 추출된 위상의 비선형 성분을 피팅하는 방법으로 박막의 두께를 측정한다 있다[16]. 또한 2017년 M. S. Kim 은 백색광 간섭 신호에 zoom FFT 를 적용하여 파장 별 성분을 복원하고 크기와 위상 모두를 이용하여 박막의 두께를 측정하였다[17]. 그러나 백색광 위상 천이 간섭계의 경우 미세 구동기 이송 방향의 진동에 민감하기 때문에 수 많은 진동 요인이 존재하는 양산 라인에 적용하기 위해서는 진동의 저감을 유도할 수 있는 고가의 장치가 필수적으로 요구된다.

분산형 백색광 간섭계 (Dispersive White-Light Interferometry, DWLI) 는 백색광 간섭계의 또 다른 형태로 백색광 위상 천이 간섭계와 유사하지만, 광학계를 기계적으로 이동시키지 않는 대신에 입사되는 빛을 분광하여 파장 별 신호를 분석한다. 초기에는 절대 거리 측정을 위해서 개발되고 연구되었으나, 이후에 박막의 두께 측정을 위한 연구도 시작되었다[18-25]. 기존의 연구에서는 <그림 1.5> 와 같이 주로 백색광 광원에서 입사되는 빛을 그레이팅

(Grating) 을 이용하여 분광한 뒤, 각 파장의 빛을 센서 배열 (Photo Detector Array, PDA) 을 이용하여 획득하는 방식을 이용하였다. 최근에는 미세 박막 패턴의 두께 형상을 측정하기 위하여 CCD (Charge-Coupled Device) 카메라를 디텍터로 이용하고 광학계로 입사되는 빛을 분광하기 위하여 음향 광학 변조 필터 등을 사용하는데, 파장을 순차적으로 변경하는 것을 가리켜 파장 주사 간섭계 (Wavelength Scanning Interferometry, WSI) 라고 부르기도 한다[26-36].



<그림 1.3 WLSI 장치 구성>



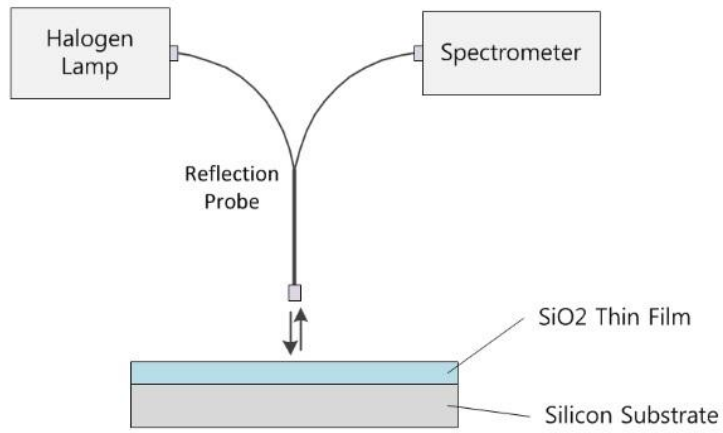
<그림 1.4 DWLI 장치 구성(U. Schnell, 1996)>

1.2.3. 분광 반사계

분광 반사계 (Spectroscopic reflectometry) 는 광원이 시료의 표면에 수직으로 입사될 때 박막의 두께에 따라 파장 별 반사도 (Spectral reflectance) 가 변하는 현상을 이용하는 측정 기술이다. 박막 물질에 조사된 빛이 반사되었을 때의 반사도는 물질의 굴절률 (Refractive index), 입사각 (Incident angle) 그리고 박막의 두께에 의해서 결정되는데 분광기 (Spectrometer) 와 같은 센서를 이용하여 파장 별 반사도를 획득한 뒤 이를 분석하여 물질의 두께와 굴절률을 계산해 낼 수 있다. 시스템의 구성이 간단하면서도 측정 가능한 두께 범위가 넓고 측정 모호성이 없으며 광학계의 구성에 따라 매우 좁은 영역에 대한 측정이 가능하다는 것이 장점이다. <그림 1.6> 는 분광 반사계 장치를 간단하게 표시한 것이다. 분광기의 내부는 그레이팅과 CCD 센서 배열로 이루어져 있어 파장 별 광 강도를 측정할 수 있는 장치이다.

분광 반사계 측정 기술이 제안된 이후 전술한 장점을 앞세워 박막의 두께를 측정하기 위한 목적으로 활용되기 위해 광범위한 연구가 진행되었다[37-46]. 분광 반사계 측정 기술의 핵심인 반사도 신호의 분석을 위한 방법으로 피크 검출법 (Peak detection method), 비선형 피팅 방법 등이 제안되었으나 이들은 각각 정밀도 및 연산 속도 측면에서 단점이 있었다. 최근에는 반사도 신호의 분석에 있어 정밀도 및 연산 속도의 개선을 위하여 여러 방법들이 제안되었는데 2013년 T. Y. Jo 는 웨이블릿 변환을 통한 위상 복원법을[43], 2015년 K. R. Kim 은 위상 추출법을 이용하여 반사도 신호를 분석함으로써 뛰어난 정밀도를 가지면서도 향상된 연산 속도를 가지는 방법임을 보여주었다[46].

미세 박막 패턴의 두께 형상 측정을 위한 이미징 분광 반사계 (Imaging Spectroscopic Reflectometry, ISR) 에 대한 연구는 주로 2000년대 이후에 이루어졌는데[41-46], 이미징 분광 반사계에서는 광학계로 입사되는 빛의 파장을 순차적으로 변경하기 위하여 음향 광학 변조 필터, 회전형 필터 등이 사용되며 CCD 카메라는 디텍터의 역할을 수행한다.



<그림 1.5 분광 반사계의 장치 구성>

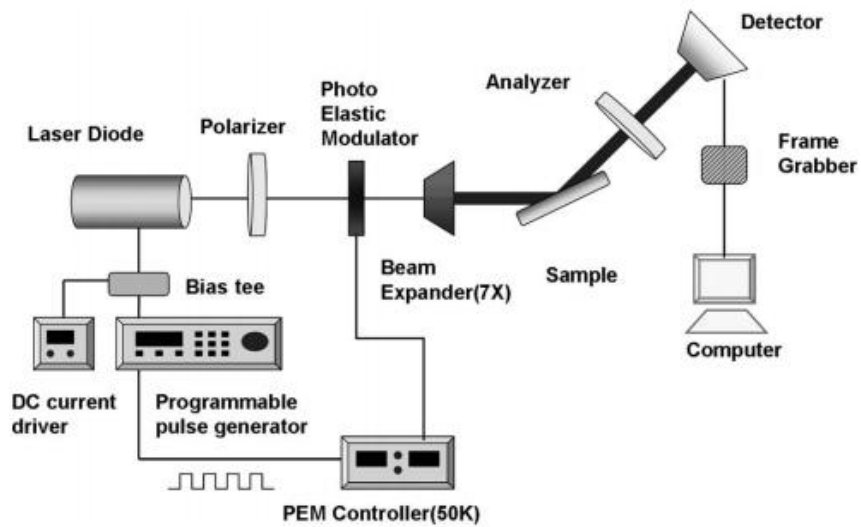
1.2.4. 타원계

반사 또는 투과되는 빛의 편광 상태는 시료의 물성과 구조에 따라 미세하게 변화하는데 타원계 (Ellipsometry) 는 빛의 편광 상태의 변화를 분석하여 박막의 두께와 굴절률 등을 분석하는 측정 기술이다. 타원계는 측정 시편의 두께와 굴절률 뿐만 아니라 물질의 조성이나 표면 거칠기 등을 측정하는 목적으로도 사용할 수 있어 활용도가 높은 기술이다. 또한 빛의 파장 범위 내에서 회절 한계에 부딪히는 백색광 간섭계나 분광 반사계 등의 다른 광학 측정 방법들과 비교할 때, 타원계에서는 위상 정보를 통해 얻어지는 높은 분해능을 이용함으로써 수 옹스트롬(\AA) 두께에 해당하는 초박막의 두께 측정이나 다층막의 두께를 측정하는 데에도 매우 뛰어난 성능을 가지고 있다.

타원계에 대한 연구는 1950년대부터 시작되어 매우 오래된 역사를 가지고 있다. 구성되는 하드웨어를 기준으로 그 분류도 매우 다양하여 광원의 종류에 따라 단색광 타원계 (Monochromatic ellipsometer), 분광 타원계 (Spectroscopic ellipsometer) 등으로 구분 될 수 있고, 분광 타원계 내에서도 사용하는 파장에 따라 가시광 (Visible) 영역 타원계, 자외선 (Ultraviolet) 영역 타원계, 적외선 (Infrared) 영역 타원계 등이 있다. 편광 상태를 측정하는 방식에 따라 RPE (Rotating Polarizer Ellipsometer), RAE (Rotating Analyzer Ellipsometer), PME (Phase Modulated Ellipsometer) 등으로 나뉘기도 한다. 타원계는 다양한 형태와 분류만큼이나 많은 연구가 이루어져 왔다[47-49].

타원계 역시 최근에는 미세 박막 패턴의 두께 형상을 측정하고자 하는 요구가 증가하고 있는데, 박막의 두께 형상을 측정하기 위한 이미징 타원계 (Imaging ellipsometer) 에 대한 연구는 1990년대에 시작되어 2000년대 이후부터 활발히 진행되었다[50-53]. <그림 1.7> 은 이미징 타원계의 장치 구성이다. 그러나 타원계는 빛의 편광 상태의 변화를 민감하게 분석해야 하기 때문에 하드웨어를 구성하기 위한 광학 부품의 구성이 까다로운 편이고, CCD 카메라를 디텍터로 사용하기에는 기존의 타원계에 비해 감도가 많이 떨어져 데이터의

신뢰도가 낮다. 또한 타원계의 경우 그 종류에 관계없이 데이터 분석이 복잡하며 숙련된 기술이 요구되므로 자동화하기가 쉽지 않아 반도체나 디스플레이 분야의 양산 관리 목적의 활용에는 어려움이 있는 상황이다.



<그림 1.6 이미징 분광 타원계의 장치 구성(C.-Y. Han, 2006)>

1.3. 연구 내용

본 연구에서는 투명 박막의 두께 형상을 안정적으로 측정하기 위한 목적으로 이미징 분광 반사계의 성능 개선 방안을 제안하였다. 이미징 분광 반사계에서는 광학계로 입사되는 빛의 파장을 순차적으로 변경하기 위하여 음향 광학 변조 필터, 회전형 필터와 같은 광원 필터링 시스템이 사용되는데 기존에 광원 필터링 시스템으로 제안된 방법들은 해당 방법들이 사용되는 결과로 이미징 분광 반사계의 강건성과 파장 분해능이 상충하는 특성이 있었다. 이러한 문제를 해결하기 위하여 회전형 필터 및 가변 조리개를 이용하여 강건성과 파장 분해능을 두루 갖춘 시스템을 구성 가능하도록 해결 방안을 제시하였다.

이미징 분광 반사계를 모사 가능한 모의 실험을 수행하여 시스템 구성에 따른 측정 성능을 평가하고 기존의 이미징 분광 반사계가 갖는 한계를 분석하였다. 이미징 분광 반사계의 파장 분해능에 따라 반복 측정을 진행했을 경우의 반복도 경향 및 측정 가능한 시편의 두께 범위를 관찰하였다.

파장 분해능을 개선하기 위한 목적으로 서로 다른 입사각을 갖는 경우 얻어지는 다중 반사도 신호를 중첩하는 다중 반사도 중첩법을 제안하였다. 입사각 별 위상 차를 이용하여 파장 축 오프셋 (Offset) 을 구하고 이를 반사도 신호에 적용시켜 다중 반사도 신호가 중첩 가능한 것을 보였다. 서로 다른 입사각을 유도하기 위한 방법으로 가변 조리개가 사용되었으며 조리개의 기하학적 구조와 파장 축 오프셋 간의 관계를 분석하였다.

제안된 방법이 측정 성능에 미치는 영향을 평가하는 실험을 수행하였다. 모의 실험을 통해 결정된 입사각을 유도하기 위한 가변 조리개를 적절하게 설계하고 이를 이미징 분광 반사계에 적용하여 시스템을 구성하였다. 다양한 시편에 대해 제안된 방법을 적용함으로써 파장 분해능이 개선된 결과를 얻을 수 있었고 측정 성능이 수치적으로 향상되는 것을 바탕으로 제안된 방법의 효용성을 확인할 수 있었다.

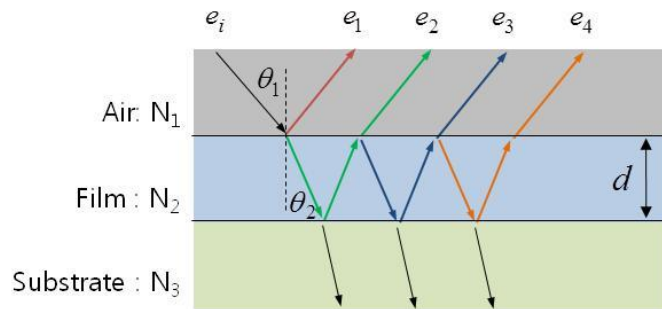
2. 배경 이론

2.1. 파장 별 반사도 신호의 수학적 표현

2.1.1. 개요

분광 반사계에서는 투명 박막의 두께와 굴절률을 측정하기 위하여 파장 별 반사도를 분석한다. 파장 별 반사도는 박막의 두께와 굴절률의 함수로, 물질의 굴절률을 정확하게 알고 있는 경우 파장 별 반사도를 이론적으로 계산해 낼 수 있다. 본 절에서는 반사도를 계산하기 위한 이론적인 배경과 수학적 모델을 소개한다.

박막 층으로 입사된 빛은 박막 내부에서 <그림 2.1> 과 같이 다중 반사를 일으킨다. 이러한 다중 반사는 빛이 박막을 통과하는 거리에 따라 위상 변화를 유발하고 서로 다른 위상을 가지는 여러 빛이 중첩되어 보강, 상쇄 간섭이 발생한다. 보강, 상쇄 간섭은 빛의 파장에 따라 다르게 발생하기 때문에 파장 별 반사도를 관찰할 경우 보강과 상쇄가 반복적으로 발생하는 형태를 확인할 수 있다. 이러한 다중 반사는 공기층과 박막층의 경계 (Interface) 에서 빛의 일부는 투과되고 일부는 반사되기 때문에 발생한다. 따라서 파장 별 반사도 신호를 계산하기 위해서는 서로 다른 광학적 특성을 갖는 매질 (Media) 의 경계에서 관찰되는 빛의 거동을 이해하는 것으로부터 시작된다.



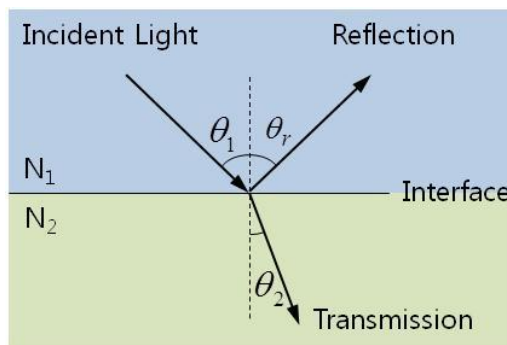
<그림 2.1 박막 물질에서의 빛의 다중 반사>

2.1.2. 스넬의 법칙

스넬의 법칙 (Snell's law) 또는 굴절의 법칙 (Law of refractive) 은 빛이 서로 다른 광학적 특성을 갖는 매질의 경계를 지날 때 입사각과 굴절각의 관계를 설명한다. 스넬의 법칙에 의하면 입사각과 굴절각에 사인 (Sine)을 취한 값의 비는 각 매질이 갖는 굴절률의 비와 같으며, 또한 각 매질에서의 위상 속도 (Phase velocity) 의 비와도 같다. 따라서 식 (2.1) 과 같이 표현될 수 있으며 여기서 θ_1 은 <그림 2.2> 에서의 입사각, θ_2 는 굴절각이며 N_1 과 N_2 는 각 매질에서의 복소 굴절률이다. 복소 굴절률은 식 (2.2) 와 같이 실수부로 굴절 계수 n 을, 허수부로 소광 계수 k 를 가지는 복소수로 표현되며 물질의 광학적인 특성을 나타내는 수치이다. 소광 계수는 빛이 매질을 지나는 동안 매질에 흡수되는 정도를 나타내는 값이다.

$$N_1 \sin \theta_1 = N_2 \sin \theta_2 \quad (2.1)$$

$$N(\lambda) = n(\lambda) - ik(\lambda) \quad (2.2)$$



<그림 2.2 서로 다른 광학적 특성을 갖는 매질 경계에서의 빛의 반사와 굴절>

2.1.3. 프레넬 방정식

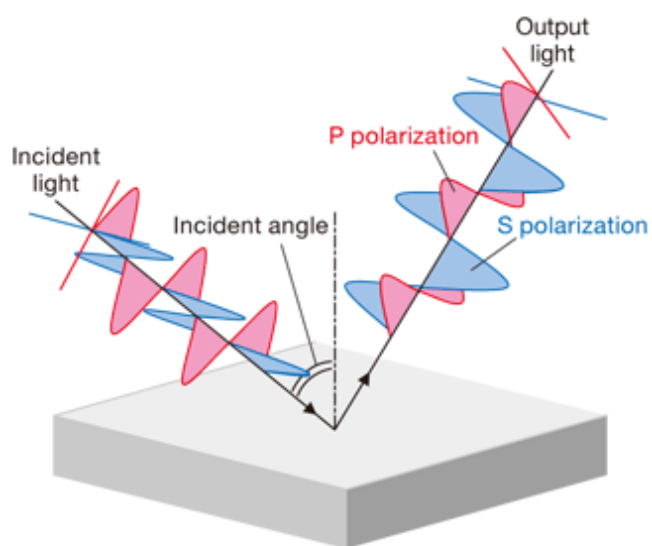
프레넬 방정식 (Fresnel's equations) 은 빛이 서로 다른 광학적 특성을 갖는 매질의 경계를 지날 때 빛의 반사계수와 투과계수를 정의한다. 이때 매질은 균일 (Homogeneous) 한 평면이어야 하며, 빛은 평면파 (Plane wave) 라고 가정한다. <그림 2.2> 에서와 같이 빛이 매질을 지날 때 일부는 굴절되고 일부는 반사되는데, 프레넬은 반사의 법칙 (Law of reflection), 스넬의 법칙과 맥스웰 방정식 (Maxwell's equations) 을 이용하여 그 특성을 수식으로 정립하였다. 프레넬 반사 계수 (Fresnel's reflection coefficients) 는 입사된 전자기파에 대한 반사된 전자기파와 굴절된 전자기파의 진폭의 비를 각각 P 파와 S 파로 나누어 정의한 수식이다. 프레넬 반사 계수와 투과 계수는 식 (2.3 a) - (2.3 d) 와 같이 표현된다. r 은 반사된 전자기파의 비율을, t 는 굴절된 전자기파의 비율을 의미한다. 위 첨자 ' p ' 와 ' s ' 는 <그림 2.3> 과 같이 각각 입사면 (Incident plane) 과 평행한 방향으로 편광 (Polarized) 된 전자기파와 입사면과 수직인 방향으로 편광된 전자기파를 의미한다. 아래 첨자 ' 12 ' 는 빛이 매질 1 에서 매질 2 방향으로 진행하고 있음을 뜻한다.

$$r_{12}^p = \frac{N_2 \cos \theta_1 - N_1 \cos \theta_2}{N_2 \cos \theta_1 + N_1 \cos \theta_2} \quad (2.3a)$$

$$r_{12}^s = \frac{N_1 \cos \theta_1 - N_2 \cos \theta_2}{N_1 \cos \theta_1 + N_2 \cos \theta_2} \quad (2.3 b)$$

$$t_{12}^p = \frac{2N_1 \cos \theta_1}{N_2 \cos \theta_1 + N_1 \cos \theta_2} \quad (2.3 c)$$

$$t_{12}^s = \frac{2N_1 \cos \theta_1}{N_1 \cos \theta_1 + N_2 \cos \theta_2} \quad (2.3 d)$$



The definition of S polarization and P polarization

<그림 2.3 빛의 편광 상태에 따른 P파와 S파의 구분>¹

¹ <http://www.products-sigmakoki.com>

2.1.4. 파장 별 반사도의 모델링

박막의 두께, 빛의 입사각과 물질의 복소 굴절률에 대한 정보가 있는 경우 프레넬 반사계수를 이용하여 빛의 다중 반사 현상을 표현하는 방법으로 박막의 파장 별 반사도를 모델링할 수 있다. <그림 2.1> 에서와 같이 박막 층으로 입사된 빛은 박막 내부에서 겪게 되는 다중 반사의 횟수에 따라 여러 성분으로 구성되는데 각각의 성분에 대한 전자기파 e_1 의 크기 및 위상의 변화를 계산할 수 있다. 식 (2.4 a) - (2.4 d) 는 다중 반사의 횟수에 따른 전자기파를 표현한 것이며 P 파와 S 파는 동일한 수식 형태를 가지므로 위 첨자를 생략하여 표시하였다. 식 (2.4) 에서 β 는 전자기파가 두께 d 를 갖는 박막 내부를 종단하는 동안 겪게 되는 위상 변화로, 식 (2.5) 와 같다.

$$\text{Reflection at Air-Film Interface: } e_1 = r_{12} \quad (2.4a)$$

$$1 \text{ Reflection in the Film Layer: } e_2 = t_{12} \cdot r_{23} \cdot t_{21} \exp(-i2\beta) \quad (2.4b)$$

$$2 \text{ Reflections in the Film Layer: } e_3 = t_{12} \cdot r_{23}^2 \cdot r_{21} \cdot t_{21} \exp(-i4\beta) \quad (2.4c)$$

$$3 \text{ Reflections in the Film Layer: } e_4 = t_{12} \cdot r_{23}^3 \cdot r_{21}^2 \cdot t_{21} \exp(-i6\beta) \quad (2.4d)$$

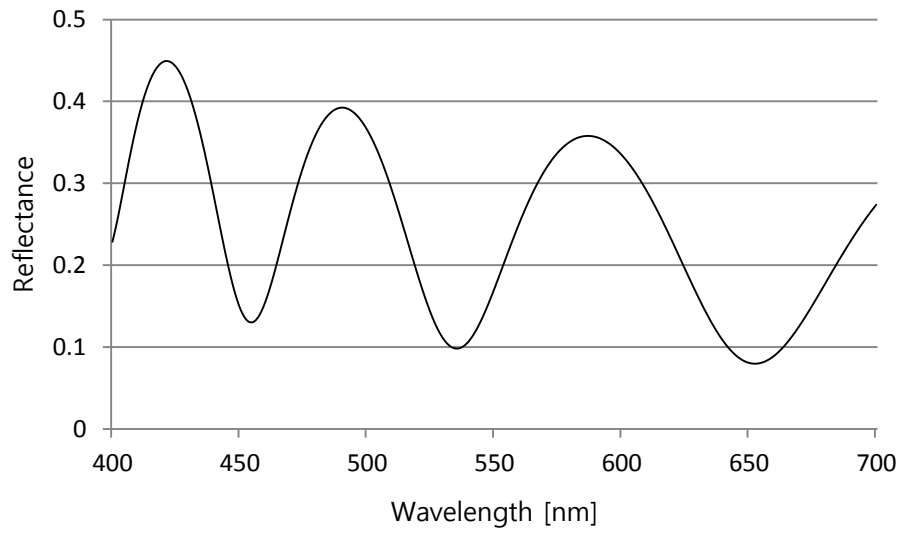
$$\beta(\lambda) = \frac{2\pi d}{\lambda} N_{film}(\lambda) \cos \theta_2 \quad (2.5)$$

총 반사 계수 (Total reflection coefficient) 는 식 (2.4) 의 박막 층으로 입사된 빛을 구성하는 여러 성분의 다중 반사 전자기파를 합한 결과이며 최종적으로 식 (2.6) 과 같이 정리될 수 있다.

$$r_{total} = \frac{r_{12} + r_{23} \exp(-i2\beta)}{1 + r_{12}r_{23} \exp(-i2\beta)} \quad (2.6)$$

식 (2.7) 은 반사도와 총 반사 계수 간의 관계를 나타낸다. 총 반사 계수는 입사된 빛의 전자기파에 대한 반사된 빛의 전자기파의 비이고, 반사도는 입사된 빛의 강도 (Intensity) 에 대한 반사된 빛의 강도의 비이다. 이때 빛의 강도는 전자기파의 크기에 비례하므로, 반사도는 총 반사 계수의 제곱과 같다. <그림 2.4> 는 파장 별 반사도를 모델링한 예로, Si 기판 (Substrate) 상 두께 1000nm SiO₂ 박막이 형성되어 있는 경우 400 - 700 nm 파장 범위에서의 반사도 신호를 나타낸다.

$$R(\lambda) = \frac{I_{ref}(\lambda)}{I_{inc}(\lambda)} = |r_{total}(\lambda)|^2 \quad (2.7)$$



<그림 2.4 모델링된 파장 별 반사도 (SiO_2 1000nm)>

2.2. 박막 두께 측정 방법

2.2.1. 개요

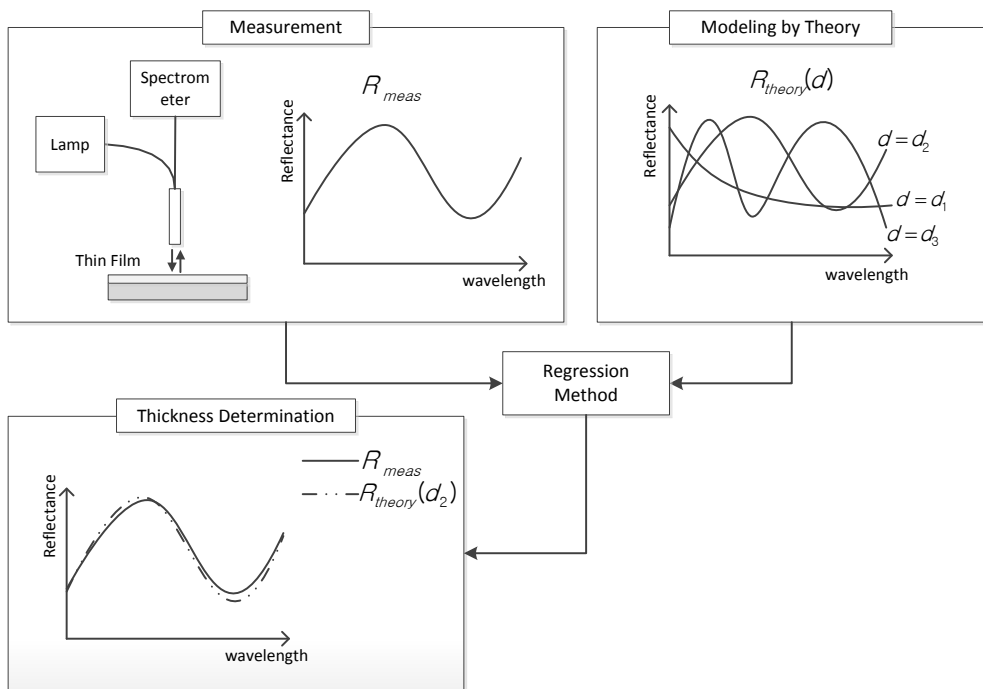
전술된 바와 같이 분광 반사계에서는 구성된 시스템을 이용하여 얻어진 파장 별 반사도 신호를 분석하여 투명 박막의 두께를 측정한다. 반사도 신호를 분석하기 위한 방법들은 모델링 기반의 분석법과 반사도 신호 자체를 분석하는 두 종류로 분류될 수 있다. 먼저 모델링 기반의 분석법은 구성된 시스템을 이용하여 얻어진 실제 반사도 신호와 모델링된 반사도 신호의 비교를 통해 결과 두께를 산출하며, 비선형 피팅법을 이용한 두께 측정 방법과 웨이블릿 변환 위상 복원법을 이용한 두께 측정 방법이 이에 해당한다. 반면 반사도 신호 자체를 분석하는 방법은 직접적으로 결과 두께를 산출하는 방식으로, 피크 검출법을 이용한 두께 측정 방법과 위상 추출법을 이용한 두께 측정 방법이 이에 해당한다. 본 절에서는 투명 박막의 두께를 결정하는 과정에서 파장 별 반사도 신호를 분석하기 위해 사용되는 다음의 방법들에 대해 살펴보고자 한다.

- ① 비선형 피팅법을 이용한 두께 측정 방법
- ② 피크 검출법을 이용한 두께 측정 방법
- ③ 웨이블릿 변환 위상 복원법을 이용한 두께 측정 방법
- ④ 위상 추출법을 이용한 두께 측정 방법

2.2.2. 비선형 피팅법을 이용한 두께 측정 방법

비선형 피팅법 (Nonlinear fitting method) 을 이용한 박막 두께 측정 방법에서는 두 종류의 반사도 신호를 비교, 분석하여 결과 두께를 얻는데 이들은 각각 구성된 시스템을 이용하여 측정된 실제 반사도 신호와 수학적 표현을 이용하여 모델링된 반사도 신호에 해당된다. <그림 2.5> 는 비선형 피팅법을 이용한 박막 두께 측정을 도식적으로 표현한 것이다. 앞서 박막의 두께, 빛의 입사각과 물질의 복소 굴절률에 대한 정보가 있는 경우 빛의 다중 반사 현상을 고려하여 박막의 파장 별 반사도를 모델링 할 수 있음을 살펴보았다. 설정된 범위의 두께에 대한 파장 별 반사도 신호를 모델링하고 모델링된 반사도 신호 각각은 구성된 시스템을 이용하여 측정된 실제 반사도 신호와 비교를 거쳐 두 반사도 신호가 가장 높은 일치도를 보이는 경우의 두께를 결과값으로 산출하는 과정을 거친다. 여러 종류의 비선형 피팅 알고리즘이 연구된 바 있으나, Levenberg-Marquardt 알고리즘이 비선형 피팅법을 이용한 두께 측정 방법에 가장 많이 적용된다[57].

박막의 두께와 물질의 굴절률을 동시에 측정할 수 있고 정확도가 뛰어난 장점을 앞세워 분광 반사계에서 가장 널리 사용되지만 반복적인 연산으로 인해 결과값을 산출하는데 시간이 오래 걸리고 두께 범위의 설정이 적절하지 못할 경우 잘못된 결과를 얻을 수 있다는 단점이 있다.



<그림 2.5 피선형 피팅법을 이용한 박막 두께 측정>

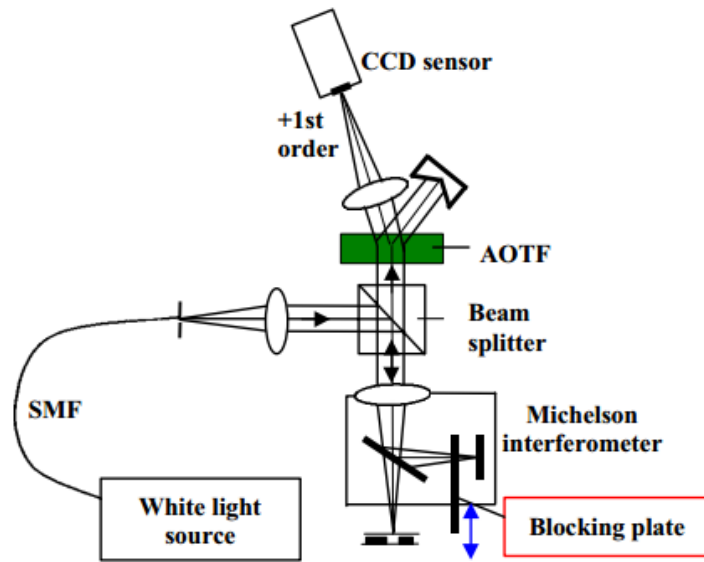
2.2.3. 피크 검출법을 이용한 박막 두께 측정 방법

비선형 피팅법을 이용한 박막 두께 측정 방법은 반복적인 연산으로 인해 결과값을 산출하는데 시간이 오래 걸리는 단점이 있는데 이러한 경우 다수의 측정 지점에 대한 박막 두께 분석에는 무리가 있다. 피크 검출법 (Peak detection method) 을 이용한 박막 두께 측정 방법은 2002년 D. S. Kim 에 의해 제안된 방법으로 비선형 피팅법을 이용한 박막 두께 측정 방법과 달리 두께 산출 과정에서 간단한 연산만을 거치기 때문에 연산 속도가 매우 빨라 다수의 측정 지점에 반복적으로 적용하기에 적합하다[41].

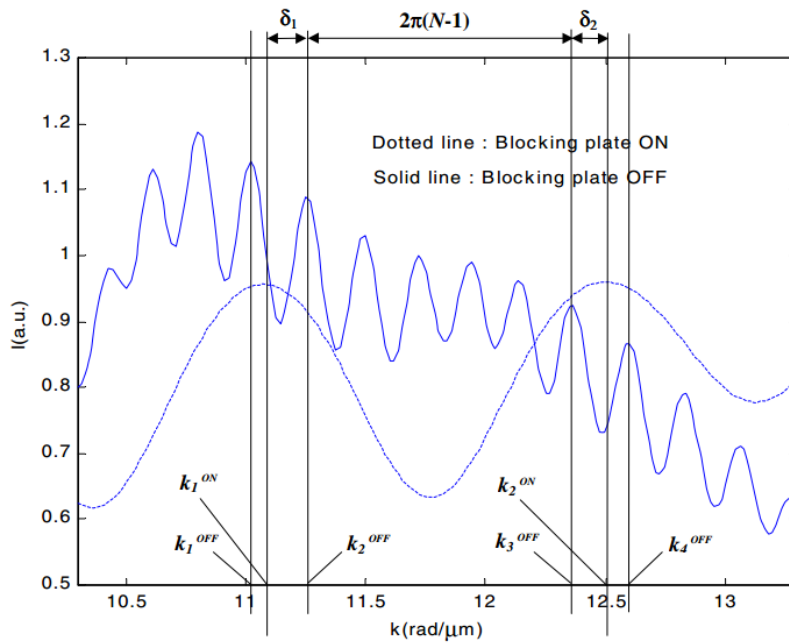
일반적으로 파장 별 반사도 신호는 <그림 2.7> 과 같이 최고점과 최저점이 반복적으로 나타나는 형태를 가진다. 피크 검출법을 이용한 박막 두께 측정 방법에서는 파장 별 반사도 신호의 가장 낮은 파장 영역에서 나타나는 최고점과 가장 높은 파장 영역에서 나타나는 최고점을 검출한 뒤, 해당 지점의 파수 (Wavenumber) k_1 , k_2 와 이에 상응하는 박막의 굴절률 $n(k_1)$, $n(k_2)$ 를 이용하여 식 (2.8) 과 같이 박막의 두께를 계산할 수 있다.

피크 검출법을 이용한 박막 두께 측정 방법 다른 박막 두께 측정 방법에 비해 연산 속도가 빠른 장점이 있으나, 정확도가 떨어지고 반사도 신호의 최고점과 최저점이 검출되지 않는 비교적 얇은 두께를 가지는 박막에는 적용이 불가능하다는 한계점이 있다.

$$d = \frac{\pi}{2\{k_2^{ON}n(k_2^{ON}) - k_1^{ON}n(k_1^{ON})\}} \quad (2.8)$$



<그림 2.6 AOTF 를 이용한 파장주사 간섭계 (D. Kim, 2002)>



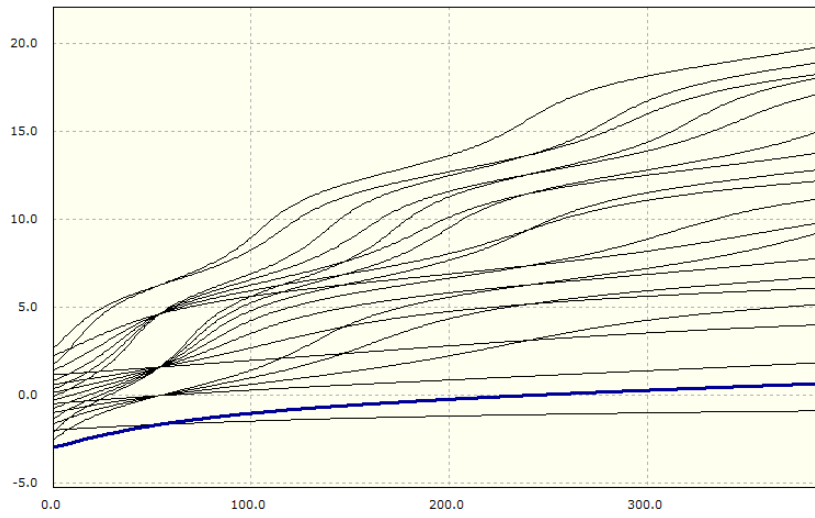
<그림 2.7 피크 검출법을 이용한 박막 두께 측정 (D. Kim, 2002)>

2.2.4. 웨이블릿 변환 위상 복원법을 이용한 박막 두께 측정 방법

웨이블릿 변환 (Wavelet transform) 위상 복원법을 이용한 박막 두께 측정 방법 역시 마찬가지로 박막의 두께를 결정하기 위해 파장 별 반사도 신호를 분석하는 과정에서 소요되는 연산 시간을 단축시키기 위한 목적으로 2013년 T. Y. Jo 에 의해 제안되었다. [43].

<그림 2.8> 은 Si 기판 상 50 nm 에서 1000 nm 사이의 두께를 갖는 SiO_2 박막이 형성되어 있는 경우 총 반사계수의 위상을 표현한 것이다. 각 두께에서 얻어진 위상은 각각 서로 다른 초기값과 기울기를 가지므로, 이를 통해 반사도 신호의 위상이 갖는 초기값과 기울기에 대한 정보를 알고 있다면 유일한 값의 박막 두께가 결정될 수 있음을 알 수 있다. 따라서 웨이블릿 변환 위상 복원법을 이용한 박막 두께 측정 방법에서는 구성된 시스템을 이용하여 얻어진 반사도 신호를 대상으로 웨이블릿 변환을 적용하여 위상을 복원하고, 복원된 위상과 이론적으로 모델링된 위상과의 유사도를 비교하여 결과 두께 값을 산출한다.

웨이블릿 변환 위상 복원법을 이용한 박막 두께 측정 방법은 비선형 피팅법을 이용한 두께 측정 방법과 비교해 유사한 수준의 측정 정확도를 유지하면서도 측정 속도를 개선시켰다. 그러나 반사도 모델링과 웨이블릿 변환을 이용한 위상 복원을 반복적으로 수행해야 하기 때문에 연산량이 적지 않은 편이고, 결과적으로 비선형 피팅법에 비해서는 매우 빠르지만 피크 검출법에 비해서는 느린 연산 속도를 보였다.

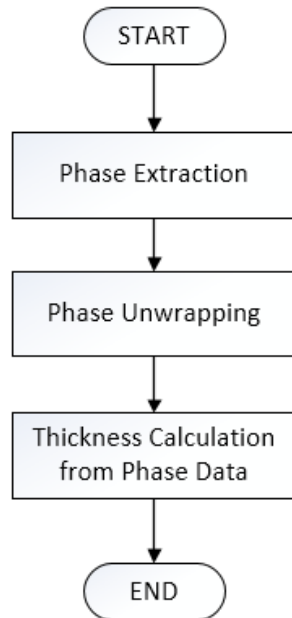


<그림 2.8 웨이블릿 변환 위상 복원법 (T.-Y. Jo, 2013)>

2.2.5. 위상 추출법을 이용한 두께 측정 방법

비선형 피팅법을 이용한 두께 측정 방법과 같은 모델링 기반의 박막 두께 분석법이 연산 속도를 향상시키는 것에 한계가 있었던 것은 반사도가 비선형적인 특성을 갖고 있어 불가피하게 반사도 신호의 모델링과 비교 연산을 반복적으로 수행하는 과정을 거쳐야 했기 때문이다. 이러한 문제점을 해결하기 위해 2015년 K. R. Kim 은 새로운 반사도 신호 해석 방법으로 위상 추출법 (Phase extraction method) 을 이용한 두께 측정 방법을 제안하였다[46].

위상 추출법을 이용한 두께 측정 방법에서는 비선형적인 특성을 갖는 반사도 신호의 수학적 표현으로부터 위상을 추출함으로써 선형적인 수식으로 변환하였고, 결과적으로 기존의 방법들과는 달리 선형 시스템의 해를 통해 두께 값을 직접적으로 계산하는 것이 가능해졌다. <그림 2.9> 는 위상 추출법을 이용한 두께 측정 방법의 전체적인 순서도를 나타낸다. 구성된 시스템을 이용하여 얻어진 반사도 신호로부터 위상을 추출하고 추출된 위상으로부터 선형 시스템의 해를 구하는 과정을 거치게 된다.



<그림 2.9 위상 추출법을 이용한 두께 측정 (K. R. Kim, 2015)>

2.3. 분광 반사계 시스템

2.3.1. 개요

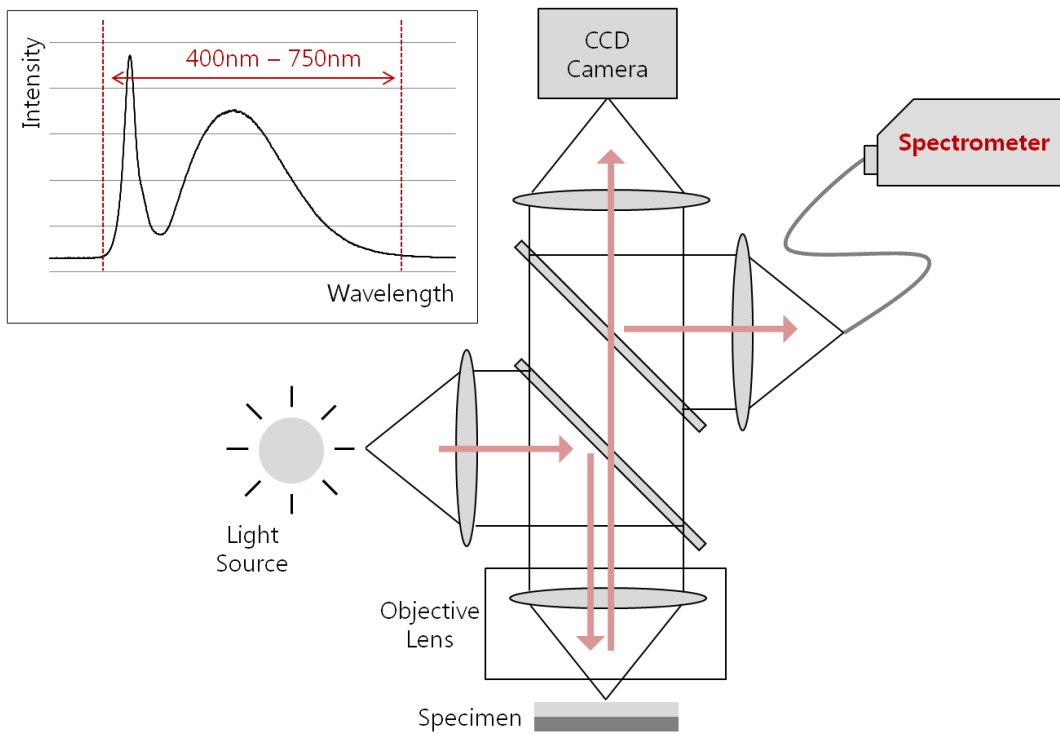
앞 절에서는 투명 박막의 두께를 결정하는 과정에서 파장 별 반사도 신호를 분석하기 위해 사용되는 방법들에 대해 살펴보았다. 살펴본 바와 같이 반사도 신호를 분석하는 방법에는 여러 종류가 있고 사용 환경 및 사용 목적에 따라 적합한 방법을 선택하여 적용 가능할 것이다. 하지만 박막의 두께를 결정하는 과정에서 반사도 신호의 분석에 사용되는 방법에 관계없이 실제 파장 별 반사도 신호를 획득하는 방법은 동일하게 사용된다. 본 절에서는 실제 파장 별 반사도 신호를 얻기 위해 필요한 시스템의 구성 및 신호를 얻는 방법에 대해 살펴보도록 한다. 분광 반사계와 이미징 분광 반사계 두 종류의 시스템으로 분류하여 살펴볼 예정이며 먼저 분광 반사계는 전통적으로 사용되는 시스템으로 디텍터로는 스펙트로미터가 사용된다. 반면 이미징 분광 반사계는 미세 박막 패턴의 두께 형상을 측정하기 위한 목적으로 주로 2000년대 이후에 활발한 연구가 진행되었으며 디텍터로는 CCD 카메라가 사용된다.

① 분광 반사계

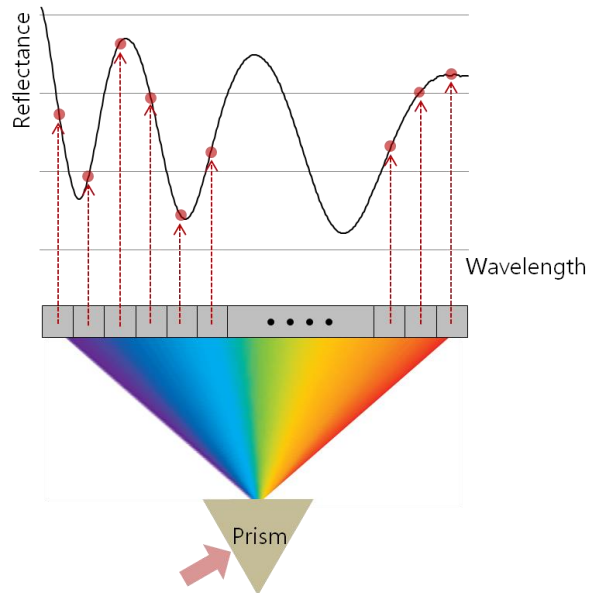
② 이미징 분광 반사계

2.3.2. 분광 반사계

<그림 2.10> 은 분광 반사계 시스템 구성을 나타내며 광원, 대물렌즈, 스펙트로미터 그리고 CCD 카메라로 구성된다. 분광 반사계에서는 활용 가능한 데이터의 범위를 확장하기 위한 목적으로 주로 가시광 범위의 파장을 갖는 백색광을 광원으로 사용한다. 광원으로부터 출발한 빛은 각종 광학 장치들을 통과하여 측정 시편에 반사된 이후 스펙트로미터로 입사된다. 스펙트로미터는 디텍터의 역할을 수행하며 여기서 CCD 카메라는 디텍터의 역할이 아닌 시편 상 정확한 측정 위치를 찾기 위한 용도 및 초점을 맞추기 위한 용도로 사용된다. <그림 2.11> 은 스펙트로미터의 내부 구조 및 파장 별 반사도 신호를 획득하는 과정을 보여준다. 스펙트로미터 내부로 입사된 백색광은 그레이팅을 통과하면서 각각의 파장 별 성분으로 나누어지고 그레이팅과 적절하게 배치된 1차원 배열 CCD 에 의해 파장 별 빛의 강도를 측정하게 된다. 결과로 파장 별 반사도 신호의 획득이 이루어지고 획득된 반사도 신호를 분석하여 두께 결과값을 산출하게 된다. 디텍터로 사용되는 스펙트로미터에 의해 파장 분해능이 뛰어나고 노이즈가 적어 안정적인 데이터가 얻어지지만 한 번 측정의 결과로 한 점에 대한 두께 획득만이 가능하고 측정 가능한 최소 영역의 크기가 비교적 커 미세 패턴의 두께 획득에 어려움이 있다.



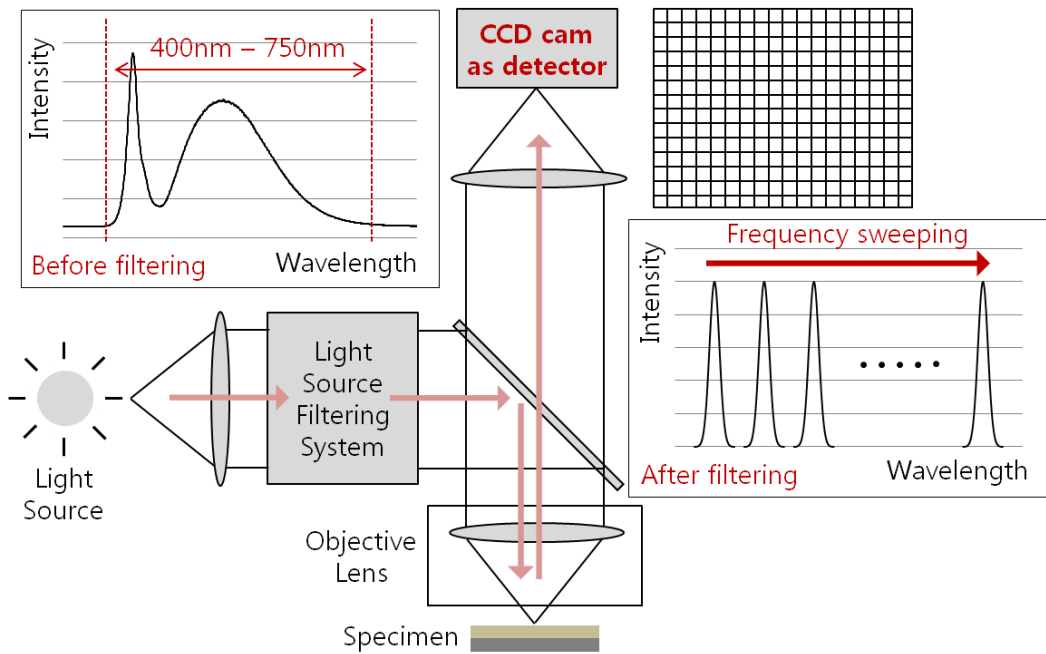
<그림 2.10 분광 반사계 시스템 구성>



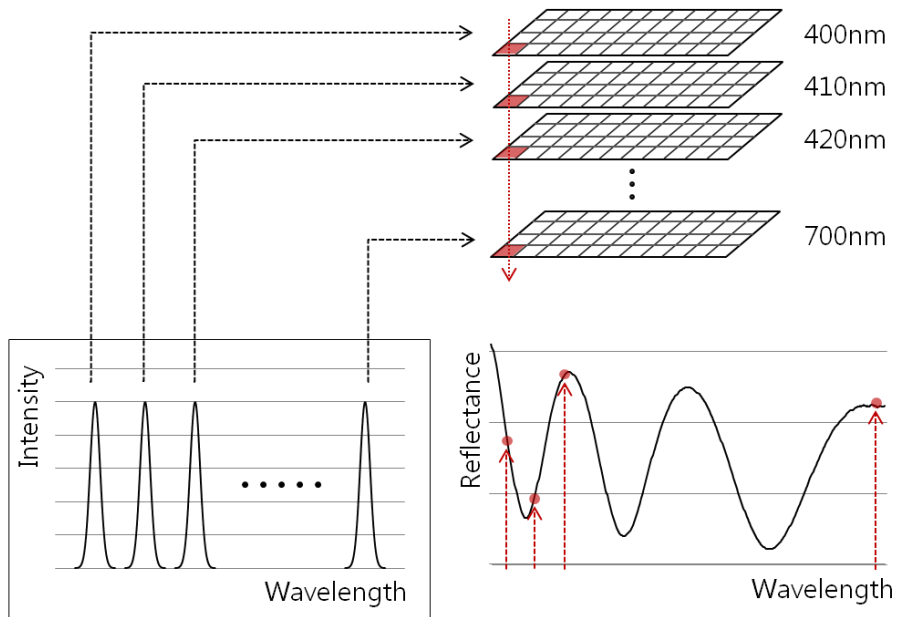
<그림 2.11 스펙트로미터 내부 구조 및 반사도 신호 획득>

2.3.3. 이미징 분광 반사계

<그림 2.12> 는 이미징 분광 반사계 시스템 구성을 나타내며 광원, 광원 필터링 시스템, 대물렌즈 그리고 디텍터의 역할을 하는 CCD 카메라로 구성된다. 이미징 분광 반사계에서도 가시광 범위의 파장을 갖는 백색광을 광원으로 사용하지만 광원이 광학계로 입사되기 전 광원 필터링 시스템을 통과하면서 좁은 밴드폭을 갖는 준 단파장 광원으로 필터링된다. 이와 같이 광원 필터링 시스템은 광학계로 입사되는 빛의 파장을 시간에 따라 순차적으로 변경하는 파장 주사의 역할을 수행한다. 파장 주사가 진행되는 동안 <그림 2.13> 과 같이 2차원 CCD 배열을 갖는 카메라를 이용하여 각 중심 파장에서의 이미지를 얻고, 결과로 여러 파장에서 획득된 다수의 이미지가 축적된다. 이때 축적된 전체 이미지에서 동일한 위치의 CCD 픽셀에서 얻어진 데이터를 연속적으로 결합하면 해당 픽셀에서의 파장 별 반사도 신호가 획득되며 반사도 신호의 분석을 통해 두께 결과값을 얻을 수 있다. CCD 카메라는 2차원 배열을 가지므로 전체 CCD 픽셀에 대한 파장 별 반사도 신호가 얻어지고 반사도 분석으로부터 얻어지는 두께값을 2차원 평면 상에 이어붙이면 한 번 측정의 결과로 면적에 대한 두께 형상의 획득이 가능하다. 최근에는 측정 대상 시편이 전체적으로 균일한 두께를 갖지 않고 국소 영역에서 미세 패턴의 형상을 보이고 있어 이러한 경우에는 이미징 분광 반사계를 이용하여 미세 패턴의 박막 두께 형상 획득이 가능한 장점이 있다.



<그림 2.12 이미징 분광 반사계 시스템 구성>



<그림 2.13 이미징 분광 반사계에서의 반사도 신호 획득>

3. 광원 필터링 시스템

3.1. 개요

미세 패턴의 박막 두께 형상 측정을 목적으로 하는 이미징 분광 반사계 시스템에서는 광학계로 입사되는 빛의 파장을 시간에 따라 순차적으로 변경하기 위해 광원 필터링 시스템을 사용한다. 본 장에서는 이미징 분광 반사계에서 널리 사용되는 두 종류의 광원 필터링 시스템에 대해 살펴보도록 한다. 압전 소자의 구동을 이용하여 백색광 광원을 필터링 하는 음향 광학 변조 필터와 밴드 패스 필터의 물리적 구동을 통해 광원을 필터링 하는 회전형 필터가 있다. 또한 회전형 필터가 적용된 이미징 분광 반사계에서는 파장 분해능이 떨어지는 단점이 있는데 파장 분해능이 떨어지는 경우 이미징 분광 반사계의 측정 성능에 미치는 영향을 살펴보려고 한다.

① 음향 광학 변조 필터

② 회전형 필터

3.2. 음향 광학 변조 필터

<그림 3.1> 는 음향 광학 변조 필터의 구조를 나타낸다. 음파 발생체, 음파 흡수체 그리고 TeO_2 결정으로 구성되는 구동부와 구동부를 제어하는 컨트롤러가 있다. 음향 광학 변조 필터의 구동 원리는 다음과 같다. TeO_2 결정에 붙어 있는 압전 소자가 일정한 주파수의 RF (Radio Frequency) 신호에 의하여 구동되면 TeO_2 결정에 음파 (Sound wave) 가 발생하게 되고, 그에 따라 결정의 굴절률이 변화하게 된다. 이때 TeO_2 결정에 빛이 입사될 경우 TeO_2 결정의 굴절률 변화에 의하여 회절이 발생하게 되고, 상호간의 광 간섭 현상으로 인해 특정 파장의 성분만 필터링 되어 TeO_2 결정을 빠져 나오는 효과로 이어진다. 음향 광학 변조 필터는 RF 신호의 입력 주파수에 따라 연속적인 파장 주사가 가능해 약 1 nm 수준의 뛰어난 파장 분해능을 갖지만 강건성이 떨어지고 광원이 음향 광학 변조 필터를 통과한 이후 광량이 낮아지는 단점이 있어 양산 장비에서는 사용되지 못하고 있다.

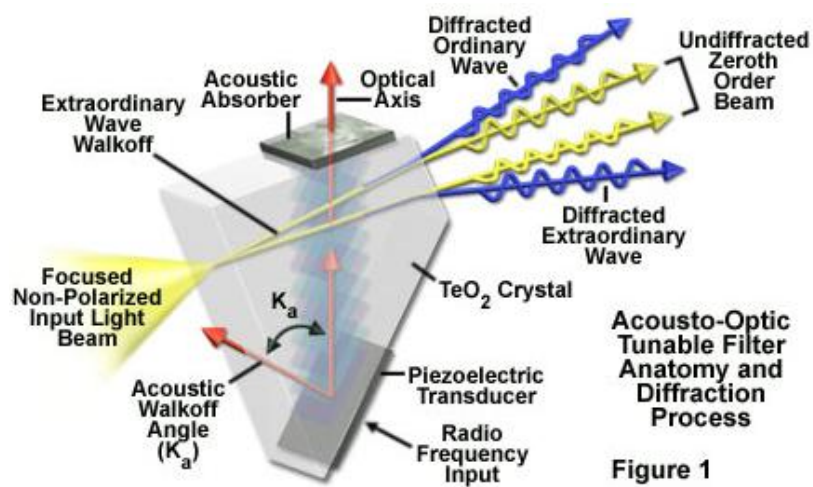


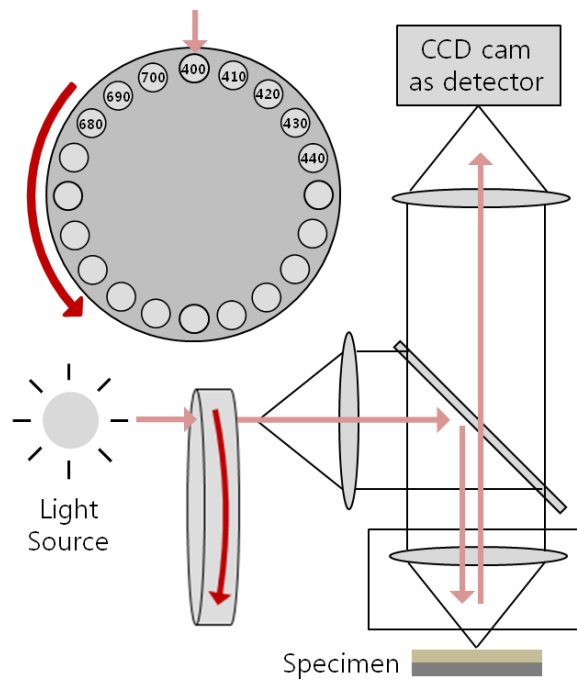
Figure 1

<그림 3.1 음향 광학 변조 필터의 구조>²

² <http://www.olympusfluoview.com>

3.3. 회전형 필터

<그림 3.2> 는 회전형 필터의 구조를 나타낸다. 회전형 필터는 회전 가능하도록 구성된 원판에 다수의 밴드 패스 필터를 설치하고 이를 광원으로부터 나온 빛이 지나가는 광경로에 위치시킨다. 빛은 밴드 패스 필터를 통과한 이후 좁은 밴드폭을 갖는 준 단파장 광원으로 필터링 되는데 이때 원판을 회전시키면 빛이 밴드 패스 필터를 순차적으로 통과하게 되어 시간에 따라 파장을 주사하는 효과를 얻게 된다. 회전형 필터는 구조가 단순해 강건성이 뛰어난 장점이 있지만 파장 분해능이 떨어지는 단점이 있다. 가시광 범위의 파장을 갖는 백색광을 광원으로 사용하는 이미징 분광 반사계에서 회전형 필터를 이용하여 음향 광학 변조 필터와 동등한 수준의 파장 분해능을 구현하기 위해서는 수백 개의 밴드 패스 필터를 원판에 설치해야 하는데 이는 현실적으로 불가능하다. 하지만 회전형 필터는 강건성이 뛰어난 장점을 앞세워 양산 장비에서 널리 사용되고 있으며 본 연구에서도 회전형 필터를 기반으로 한 해결 방안을 제시하여 강건성과 파장 분해능을 두루 갖춘 시스템을 구성하도록 한다.



<그림 3.2 회전형 필터의 구조>

3.4. 파장 분해능의 영향

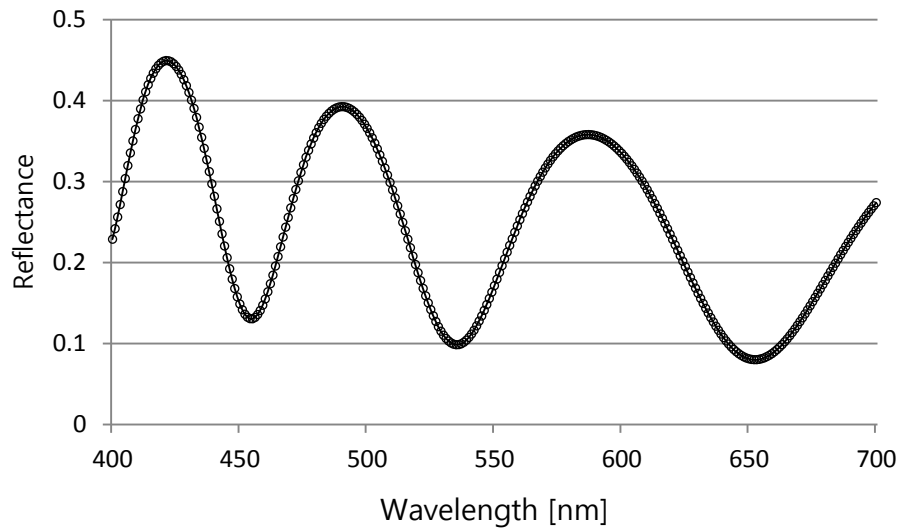
3.4.1. 개요

이미징 분광 반사계에서는 광학계로 입사되는 빛의 파장을 순차적으로 변경하기 위하여 음향 광학 변조 필터, 회전형 필터와 같은 광원 필터링 시스템이 사용되는데 기존에 광원 필터링 시스템으로 제안된 방법들은 해당 방법들이 사용되는 결과로 이미징 분광 반사계의 강건성과 파장 분해능이 상충하는 특성이 있다. 본 연구는 양산 장비에서 널리 사용되고 있는 회전형 필터를 기반으로 강건성과 파장 분해능을 두루 갖춘 시스템을 구성하는 것을 목표로 하는데, 전술한 바와 같이 회전형 필터가 적용된 이미징 분광 반사계에서는 설치되는 밴드 패스 필터의 수가 많아질수록 파장 분해능이 좋아지지만 공간적, 비용적 제약에 의해 확보 가능한 파장 분해능에는 한계가 있다.

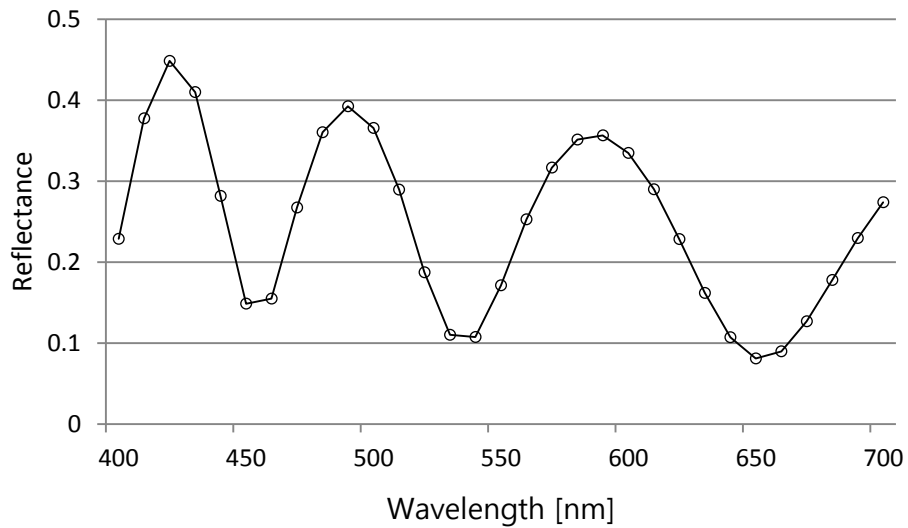
<그림 3.3>, <그림 3.4> 는 파장 별 반사도 신호를 모델링한 예로, Si 기판 상 두께 1000 nm SiO_2 박막이 형성되어 있는 경우 400 - 700 nm 파장 범위에서의 반사도 신호를 나타낸다. 반사도 신호를 모델링 하는 과정에서 <그림 3.3> 은 1 nm 의 파장 분해능을, <그림 3.4> 는 10 nm 의 파장 분해능을 갖는 조건이 적용되었는데 그림에서와 같이 10 nm 의 파장 분해능을 갖는 경우 1 nm 의 파장 분해능을 갖는 경우에 비해 파장 분해능이 떨어지므로 촘촘하지 못한 반사도 신호가 얻어진 것을 알 수 있다. 본 절에서는 해결 방안의 제시에 앞서 <그림 3.4> 와 같이 파장 분해능이 떨어지는 경우 이미징 분광 반사계의 측정 성능에 미치는 영향을 살펴보고자 한다.

① 측정 가능한 박막 두께 범위

② 반복도



<그림 3.3 모델링된 반사도 신호 (SiO₂ 1000nm 1nm interval)>

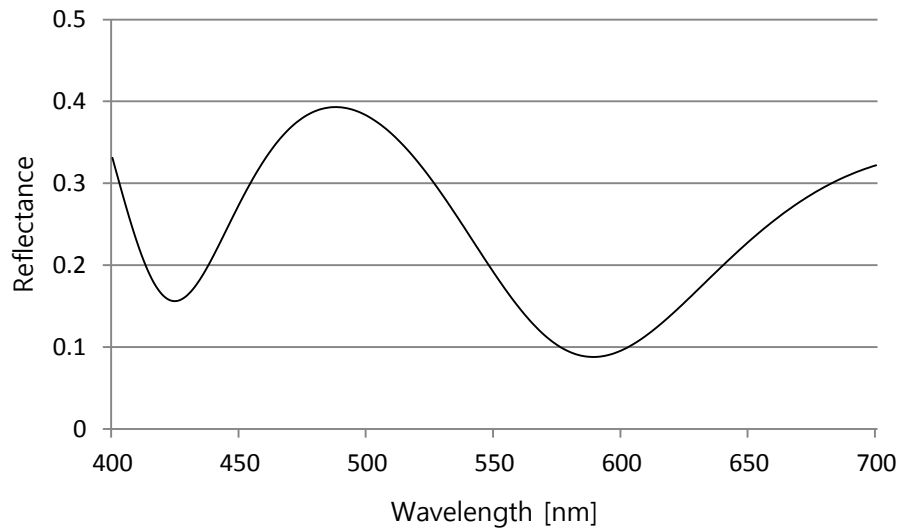


<그림 3.4 모델링된 반사도 신호 (SiO₂ 1000nm 10nm interval)>

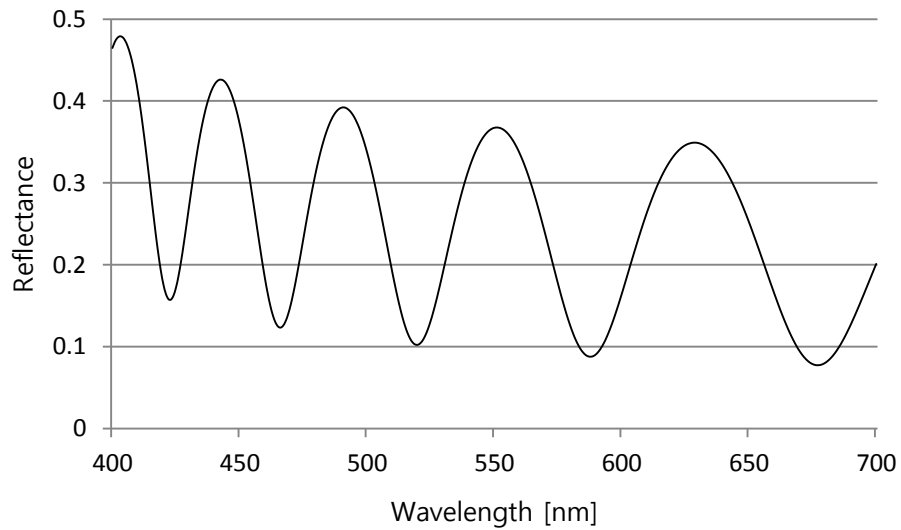
3.4.2. 측정 가능한 박막 두께 범위

<그림 3.5>, <그림 3.6>, <그림 3.7> 은 파장 별 반사도 신호를 모델링한 예로, 각각 Si 기판 상 두께 500 nm, 1500 nm, 2500 nm SiO_2 박막이 형성되어 있는 경우 400 - 700 nm 파장 범위에서의 반사도 신호를 나타낸다. 그림에서와 같이 박막의 두께가 두꺼워질수록 반사도 신호의 최고 (Peak), 최저 (Valley) 점이 많아져 반사도 신호는 고주파의 형상을 보이는 것을 알 수 있다.

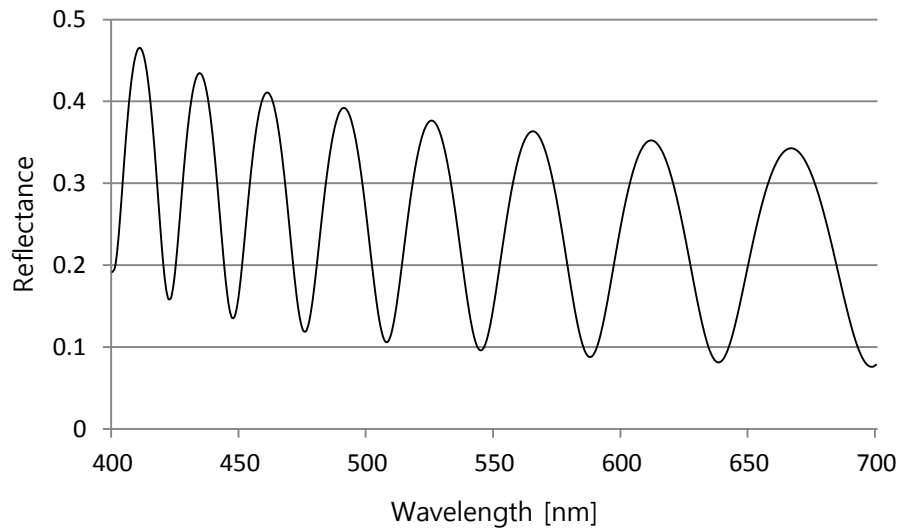
<그림 3.8>, <그림 3.9>, <그림 3.10> 은 Si 기판 상 2500 nm 두께의 SiO_2 박막이 형성되어 있는 경우 모델링된 파장 별 반사도 신호이며 각각 2.5 nm, 5 nm, 10 nm 의 파장 분해능을 갖는다. 비교적 두꺼운 박막의 두께로 인해 반사도 신호는 고주파의 형상을 띄는데 <그림 3.8> 과 같이 파장 분해능이 높은 경우에는 반사도 신호가 문제 없이 모델링 되지만 파장 분해능이 점차 낮아져 <그림 3.10> 의 경우에는 샘플링 (Sampling) 이 부족해 반사도 신호가 정확하게 모델링 되지 못하고 왜곡이 발생한 것을 알 수 있다. 박막 두께 측정 방법 중 가장 널리 사용되는 비선형 피팅법에서는 구성된 시스템을 통해 측정된 실제 반사도 신호와 수학적 표현을 이용하여 모델링된 반사도 신호를 비교 분석하여 결과 두께를 얻는데 <그림 3.11> 과 같이 파장 분해능이 낮을 경우 실제 얻어지는 반사도 신호에 왜곡이 발생해 모델링된 반사도 신호와 정확한 비교가 어렵고 결과적으로 획득된 두께 값에도 오차가 발생하게 된다.



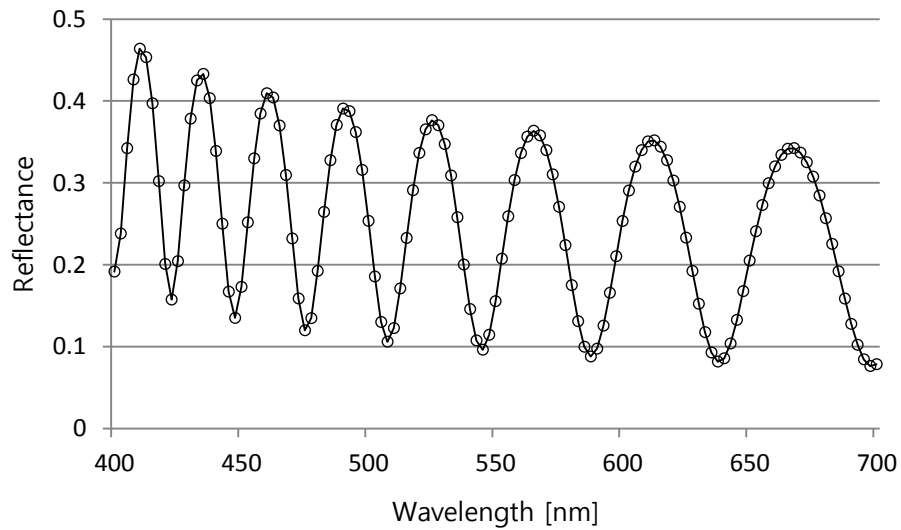
<그림 3.5 모델링된 반사도 신호 (SiO₂ 500nm)>



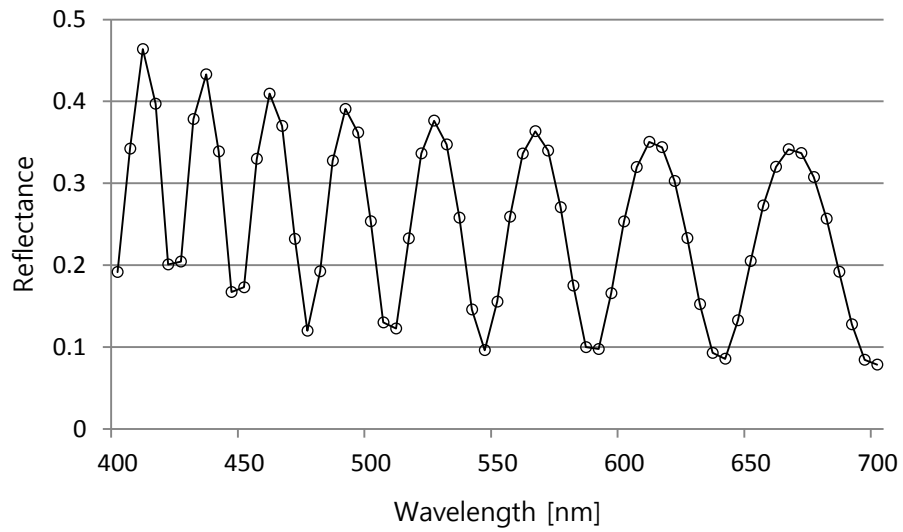
<그림 3.6 모델링된 반사도 신호 (SiO₂ 1500nm)>



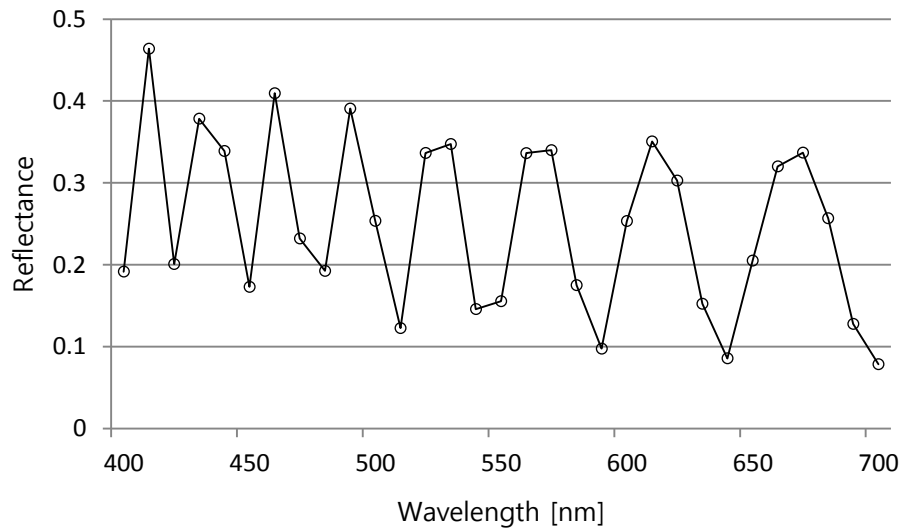
<그림 3.7 모델링된 반사도 신호 (SiO_2 2500nm)>



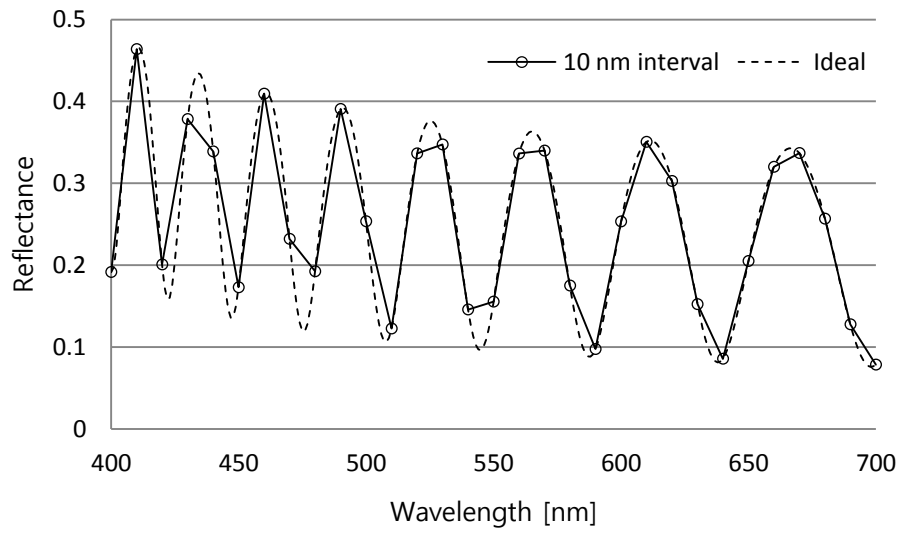
<그림 3.8 모델링된 반사도 신호 (SiO_2 2500nm 2.5nm interval)>



<그림 3.9 모델링된 반사도 신호 (SiO_2 2500nm 5nm interval)>



<그림 3.10 모델링된 반사도 신호 (SiO_2 2500nm 10nm interval)>



<그림 3.11 반사도 신호의 비교 (SiO₂ 2500nm)>

3.4.2. 반복도

반복도는 동일한 방법으로 동일한 측정 대상을 동일한 환경에서 비교적 짧은 시간에 반복하여 측정한 경우, 각각의 측정 결과가 일치하는 정도를 나타내는 수치이다. 계측 장비의 성능 평가에서 반복도는 매우 중요한 항목인데 본 절에서는 파장 분해능이 반복도에 미치는 영향을 살펴보고자 한다.

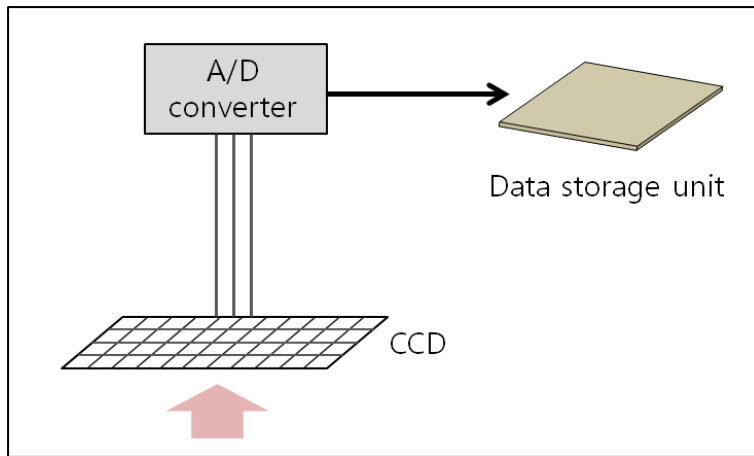
<그림 3.12> 는 이미징 분광 반사계에서 디텍터로 사용되는 CCD 카메라의 내부 구조이며 2차원 배열의 센서와 ADC (Analog-Digital Converter), 저장 장치 등으로 구성된다. 이때 센서의 SNR (Signal-to-Noise Ratio) 이 낮거나 ADC 의 해상도가 충분하지 않은 경우 CCD 카메라를 통해 얻어진 신호의 형상을 비정상적으로 변형시키는 노이즈가 발생한다. 특히, 대부분의 이미징 분광 반사계의 경우 8 - 12 비트 사이의 ADC 를 사용하므로 이러한 노이즈가 비교적 크며 결과로 파장 별 반사도 신호의 형상을 왜곡시키게 된다.

<그림 3.13> 은 Si 기판 상 두께 1000 nm SiO_2 박막이 형성되어 있는 시편을 실제 측정하여 얻어지는 450 - 700 nm 파장 범위에서의 파장 별 반사도 신호이다. 동일한 측정 지점을 동일한 환경에서 10회 반복 측정한 경우 얻어지는 반사도 신호를 중첩시킨 결과이며 이상적인 경우에 가까울수록 모든 반사도 신호는 동일한 형상을 가져야 하지만 CCD 카메라로부터 발생하는 노이즈의 영향으로 측정 순서에 따른 반사도 신호의 형상에 차이가 있음을 알 수 있다. 또한 반사도 신호의 형상에 차이가 있는 경우 결과적으로 얻어지는 두께 값도 달라지기 때문에 반복 측정시의 반복도가 나빠지는 원인이 된다.

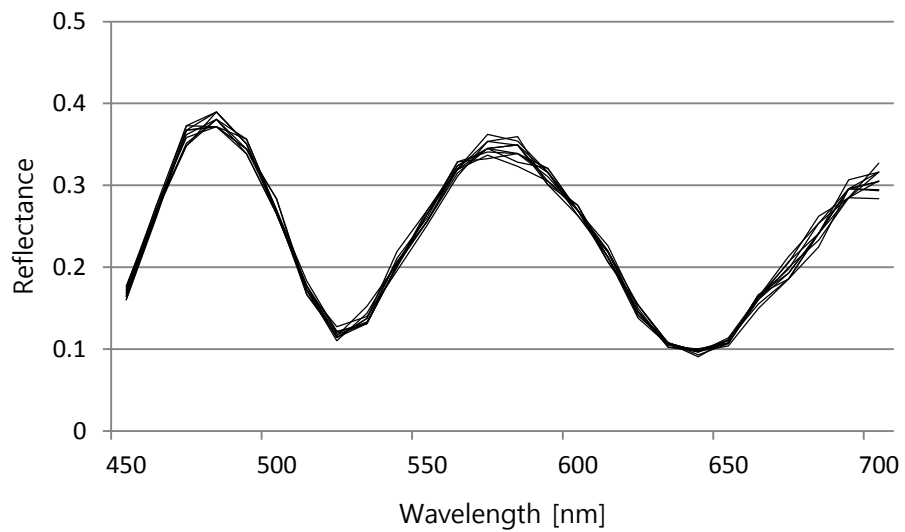
노이즈에 의해 파장 별 반사도 신호의 형상에 왜곡이 생긴 경우 파장 분해능이 반복도에 미치는 영향을 모의 실험을 통해 살펴보도록 한다. 비선형 피팅법을 이용한 박막 두께 측정 방법에서는 구성된 시스템을 이용하여 측정된 실제 반사도 신호와 수학적 표현을 이용하여 모델링된 반사도 신호를 비교, 분석하여 결과 두께를 얻게 된다. 노이즈에 의해 반사도 신호가 왜곡되는 현상을 반영하기 위해 <그림 3. 14> 와 같이 모델링된 반사도 신호에 노이즈

를 추가하고, 노이즈가 추가된 신호를 실제 반사도 신호로 가정하여 비선형 피팅법을 통해 두께 결과값을 얻는 과정을 20회 반복한다. 이때 모델링된 반사도 신호의 파장 분해능이 1 nm, 3 nm, 5 nm, 10 nm 인 각각의 경우에 대해 반복 연산을 거쳐 최종적으로는 파장 분해능에 따른 반복도 경향을 비교하고자 한다.

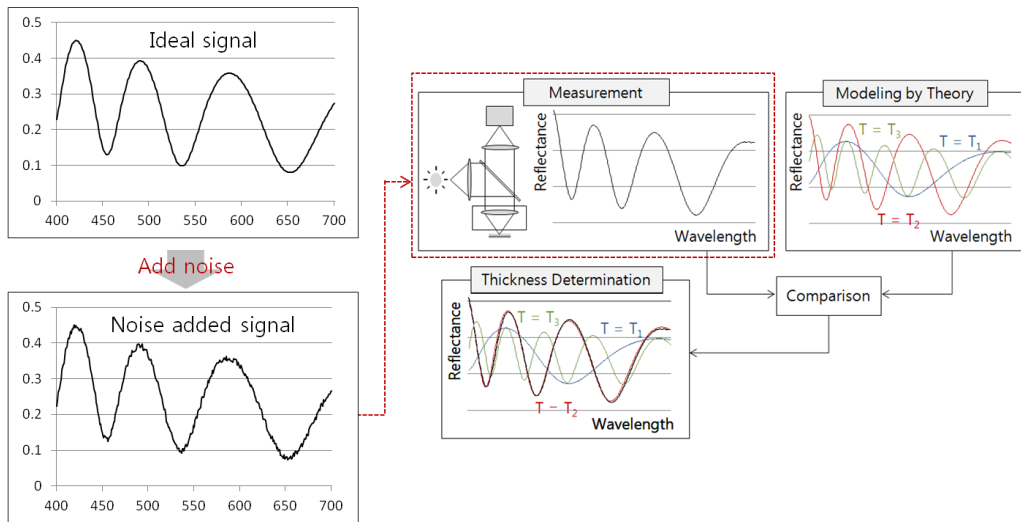
<표 3.1> 과 <표 3.2> 는 파장 분해능이 반복 측정 반복도에 미치는 영향을 살펴보기 위해 두께 100 nm 의 시편과 두께 1000 nm 의 시편에 대해 진행된 모의 실험 결과이다. 측정 시편의 두께에 관계없이 파장 분해능이 낮아질수록 반복도가 나빠지는 결과를 확인할 수 있다.



<그림 3.12 CCD 카메라의 내부 구조>



<그림 3.13 반복 측정 시 획득된 반사도 신호 중첩>



<그림 3.14 파장 분해능에 따른 반복도 모의 실험>

<표 3.1 파장 분해능에 따른 반복도 모의 실험 (두께 100 nm)>

Wavelength interval	10 nm	5 nm	3.3 nm	1 nm
Max thickness	101.2	99.6	99.5	98.9
Min thickness	94.8	94.5	96.0	96.9
3 STDEV	4.8	3.8	2.0	1.6

<표 3.2 파장 분해능에 따른 반복도 모의 실험 (두께 1000 nm)>

Wavelength interval	10 nm	5 nm	3.3 nm	1 nm
Max thickness	994.4	994.5	993.5	993.5
Min thickness	990.5	990.5	991.5	992.5
3 STDEV	3.5	3.2	2.0	0.9

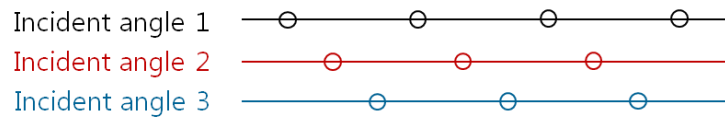
4. 다중 반사도 중첩법

4.1. 개요

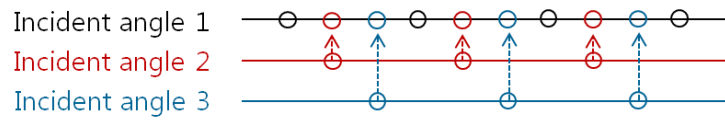
이미징 분광 반사계 시스템에서는 광학계로 입사되는 빛의 파장을 순차적으로 변경하기 위해 광원 필터링 시스템이 사용되는데 대표적인 광원 필터링 시스템으로는 음향 광학 변조 필터와 회전형 필터가 있다. 전술한 바와 같이 음향 광학 변조 필터의 경우 뛰어난 파장 분해능을 갖지만 강건성이 떨어지는 단점이 있고, 회전형 필터는 강건성이 뛰어난 장점이 있지만 파장 분해능이 떨어지는 단점이 있다. 본 장에서는 강건성과 파장 분해능을 두루 갖춘 이미징 분광 반사계 시스템이 구성 가능하도록 회전형 필터를 기반으로 한 해결 방안을 제시하도록 한다.

회전형 필터가 적용된 이미징 분광 반사계에서 회전 원판에 설치되는 밴드 패스 필터의 수가 많아질수록 파장 분해능 또한 증가할 것이다. 하지만 단순히 설치되는 밴드 패스 필터의 수를 증가시키는 방법은 공간적, 비용적 측면에서 바람직하지 않으며 확보 가능한 파장 분해능에도 한계가 있다. 본 연구에서 제안하는 다중 반사도 중첩법 (Multi reflectance method)에서는 밴드 패스 필터의 추가 없이 기존과 동일한 구성의 회전형 필터가 사용되므로 회전형 필터의 이점인 강건성을 유지하면서 파장 분해능을 증가시킬 수 있는 장점이 있다. <그림 4.1>는 다중 반사도 중첩법의 순서도를 나타낸다.

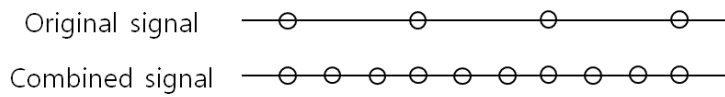
Step 1 : Acquisition of reflectance signals at different incident angles



Step 2 : Combination of multi-reflectance signals through wavelength shift



Step 3 : Improved wavelength resolution



<그림 4.1 다중 반사도 중첩법의 순서도>

4.2. 다중 반사도 중첩법을 이용한 파장 분해능 개선

4.2.1. 다중 반사도 중첩법의 도입

파장 별 반사도 신호의 수학적 표현을 설명한 2장에서 박막 층으로 입사된 빛의 다중 반사를 고려하여 총 반사 계수를 얻을 수 있음을 보였다. 얻어진 총 반사 계수 수식을 전개 해보면 총 반사 계수는 식 (4.1) 과 같이 복소수로 정리 가능하고 따라서 크기와 위상으로 표현 가능함을 알 수 있다.

$$\begin{aligned}
 r_{total} &= \frac{r_{12} + r_{23} \exp(-i2\beta)}{1 + r_{12}r_{23} \exp(-i2\beta)} \\
 &= \frac{(r_{12} + r_{23}(\cos(2\beta)) - i \cdot r_{23}(\sin(2\beta)))}{(1 + r_{12}r_{23}(\cos(2\beta)) - i \cdot r_{12}r_{23}(\sin(2\beta)))} \times \frac{(1 + r_{12}r_{23}(\cos(2\beta)) + i \cdot r_{12}r_{23}(\sin(2\beta)))}{(1 + r_{12}r_{23}(\cos(2\beta)) + i \cdot r_{12}r_{23}(\sin(2\beta)))} \\
 &= \frac{[r_{12}(1 + r_{23}^2) + r_{23}(1 + r_{12}^2)\cos 2\beta] + i \cdot [r_{23}(r_{12}^2 - 1)\sin 2\beta]}{1 + 2r_{12}r_{23}\cos 2\beta + r_{12}^2r_{23}^2} \\
 &= a + i \cdot b = G \cdot (\exp(i\psi))
 \end{aligned} \tag{4.1}$$

$$a = \frac{r_{12}(1 + r_{23}^2) + r_{23}(1 + r_{12}^2)\cos 2\beta}{1 + 2r_{12}r_{23}\cos 2\beta + r_{12}^2r_{23}^2} \tag{4.2a}$$

$$b = \frac{r_{23}(r_{12}^2 - 1)\sin 2\beta}{1 + 2r_{12}r_{23}\cos 2\beta + r_{12}^2r_{23}^2} \tag{4.2b}$$

총 반사 계수의 크기와 위상을 전개하여 정리하면 식 (4.3), (4.4) 와 같으며 수식으로부터 총 반사 계수의 크기와 위상은 전자기파가 두께 d 를 갖는 박막 내부를 종단하는 동안 겪게 되는 위상 변화 β 와 입사된 전자기파에 대한 반사된 전자기파의 진폭의 비를 나타내는 프레넬 반사 계수의 함수임을 알 수 있다. 식 (4.3), (4.5) 에서 위상 변화와 프레넬 반사 계수는 빛의 입사각 θ 의 함수이므로 결과적으로 총 반사 계수의 크기와 위상 또한 빛의 입사각의 함수가 된다.

$$G = \sqrt{a^2 + b^2}$$

$$= \frac{\{[r_{12}(1 + r_{23}^2) + r_{23}(1 + r_{12}^2)\cos 2\beta]^2 + [r_{23}(r_{12}^2 - 1)\sin 2\beta]^2\}^{1/2}}{1 + 2r_{12}r_{23}\cos 2\beta + r_{12}^2r_{23}^2} \quad (4.3)$$

$$\psi = \arctan\left(\frac{b}{a}\right)$$

$$= \arctan \frac{r_{23}(r_{12}^2 - 1)(\sin(2\beta))}{r_{12}(1 + r_{23}^2) + r_{23}(1 + r_{12}^2)(\cos(2\beta))} \quad (4.4)$$

<그림 4.2>, <그림 4.3> 는 파장 별 총 반사 계수의 크기와 위상을 모델링한 예로, Si 기판 상 두께 1000 nm SiO₂ 박막이 형성되어 있는 경우 400 - 700 nm 파장 범위에서의 총 반사 계수의 크기와 위상을 나타낸다. 크기와 위상을 모델링 하는 과정에서 실선은 0° 의 입사각을, 점선은 15° 의 입사각을 갖는 조건이 적용되었는데 그림에서와 같이 입사각이 달라짐에 따라 총 반사 계수의 크기와 위상 모두에서 파장 축 오프셋이 발생한 것을 알 수 있다. 여기서 총 반사 계수의 크기는 반사도와 같은 값을 갖는다.

다음으로 서로 다른 입사각으로 인해 파장 축으로 평행 이동된 반사도 신호들 중 하나의 반사도 신호를 기준으로 나머지 반사도 신호에 파장 축 오프셋을 보상하여 두 반사도 신호가 파장 축 평행 이동 없이 중첩될 수 있도록 유도하고자 한다. 본 경우에는 15° 의 입사각을 갖는 경우의 반사도 신호에 파장 축 오프셋을 보상하여 0° 의 입사각을 갖는 경우의 반사도 신호와 중첩되는 과정을 살펴보도록 한다. <그림 4.4>는 <그림 4.2>의 사각형 점선 표시 영역을 확대하여 보여주는데 그림과 같이 두 반사도 신호가 파장 축 평행 이동 없이 중첩되려면 적절한 파장 축 오프셋이 적용되어야 한다. 적절한 파장 축 오프셋을 구하기 위해 총 반사 계수의 위상을 이용하도록 한다. <그림 4.5>는 <그림 4.3>의 사각형 점선 표시 영역이 확대된 모습이며 식 (4.5)와 같이 서로 다른 입사각을 갖는 총 반사 계수의 두 위상이 동일한 값을 갖게 하는 $\Delta\lambda$ 를 구하여 두 반사도 신호를 중첩시키기 위한 파장 축 오프셋으로 적용한다.

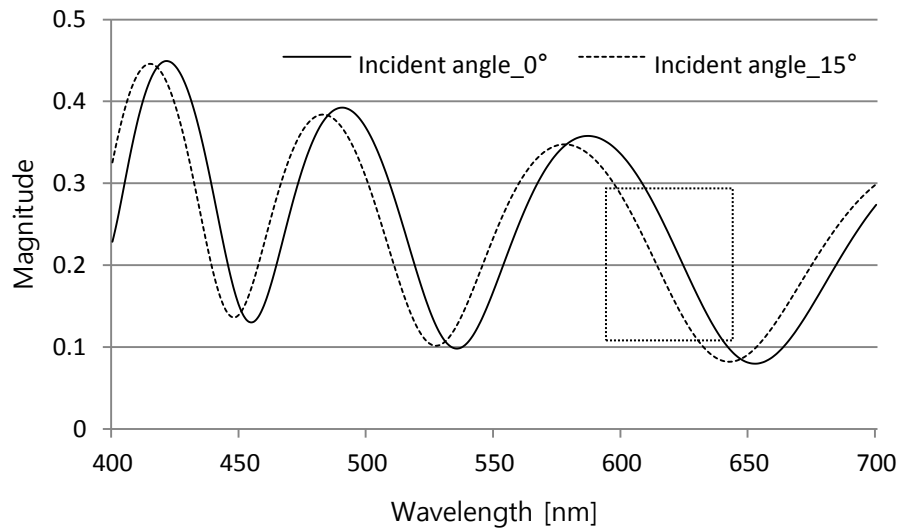
$$\psi(\theta_1, \lambda_k) = \psi(\theta_2, \lambda_k + \Delta\lambda) \quad (4.5)$$

<그림 4.6>은 총 반사 계수의 두 위상을 이용하여 구해진 파장 축 오프셋 나타내며 전체 파장 범위에서 동일한 변위 값을 갖지 않고 파장 별로 다소간의 차이를 보이는 것을 알 수 있다. <그림 4.7>은 <그림 4.6>에서 구해진 파장 축 오프셋을 0° 의 입사각을 갖는 경우의 반사도 신호에 적용하여 두 반사도 신호를 중첩시킨 결과이다.

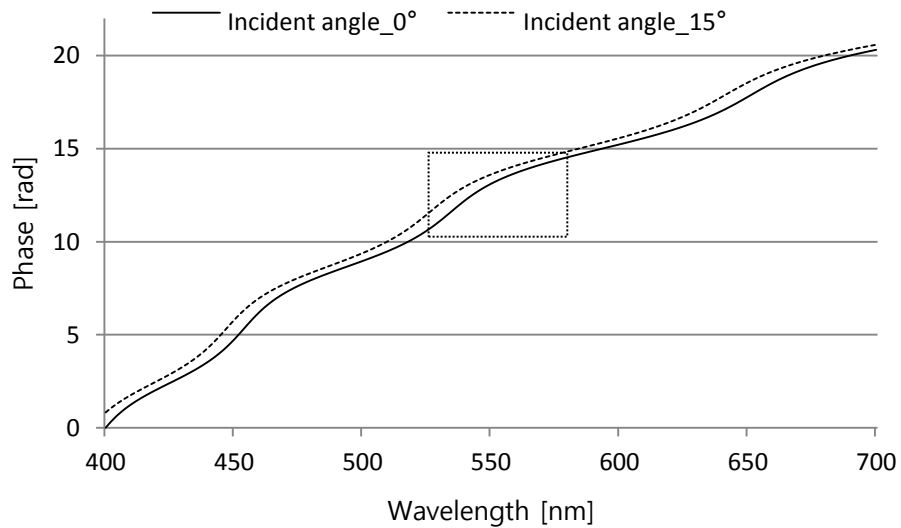
두 반사도 신호는 높은 일치도를 보이므로 총 반사 계수의 위상을 이용하여 구해진 파장 축 오프셋을 적용하여 서로 다른 입사각으로 인해 파장 축으로 평행 이동된 반사도 신호를 중첩시킬 수 있음을 알 수 있다.

현재까지 진행한 동일한 과정을 구성된 이미징 분광 반사계 시스템으로부터

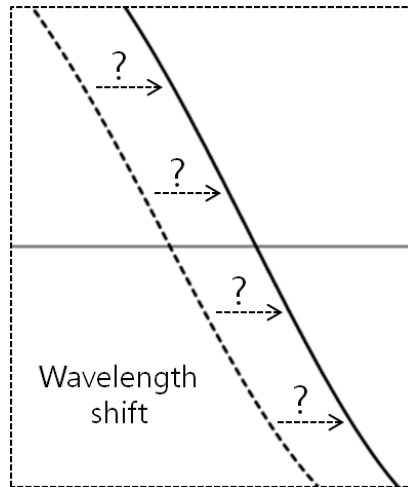
터 얻어지는 반사도 신호에 적용해 보고자 한다. <그림 4.8>, <그림 4.9> 는 파장 별 총 반사 계수의 크기와 위상을 모델링한 예로, Si 기판 상 두께 1000 nm SiO_2 박막이 형성되어 있는 경우 400 - 700 nm 파장 범위에서의 총 반사 계수의 크기와 위상을 나타낸다. 크기와 위상을 모델링 하는 과정에서 실선은 0° 의 입사각을, 점선은 5° 의 입사각을 갖는 조건이 적용되었는데 회전형 필터에 10 nm 간격으로 밴드 패스 필터가 설치된 경우를 가정하여 각각의 크기와 위상은 파장 축으로 총 31개의 데이터를 갖게 된다. <그림 4.10> 는 <그림 4.8>의 사각형 점선 표시 영역을 확대하여 보여주는데 파장 축 오프셋을 적용하여 두 반사도 신호가 중첩되도록 유도할 경우 서로 다른 입사각을 갖는 반사도 신호의 데이터와 데이터 사이를 채워주는 효과를 얻게 된다. 마찬가지로 <그림 4.11> 은 총 반사 계수의 위상을 이용하여 구해진 파장 축 오프셋을 나타내며 <그림 4.12> 는 <그림 4.11>의 파장 축 오프셋을 <그림 4.8>의 5° 의 입사각을 갖는 경우의 반사도 신호에 적용시켜 두 반사도 신호를 중첩시킨 결과이다. 두 반사도 신호는 높은 일치도를 보이며 서로 다른 입사각을 갖는 반사도 신호의 데이터와 데이터 사이를 채워주고 있으므로 중첩된 두 반사도 신호의 데이터를 통합하여 하나의 반사도 신호를 구성한다면 각각의 반사도 신호 대비 파장 분해능이 증가한 결과를 얻을 수 있다.



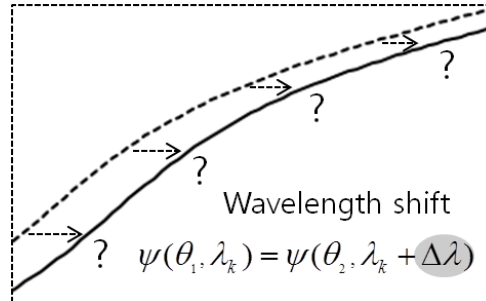
<그림 4.2 입사각에 따른 총 반사 계수의 크기(SiO_2 1000 nm)>



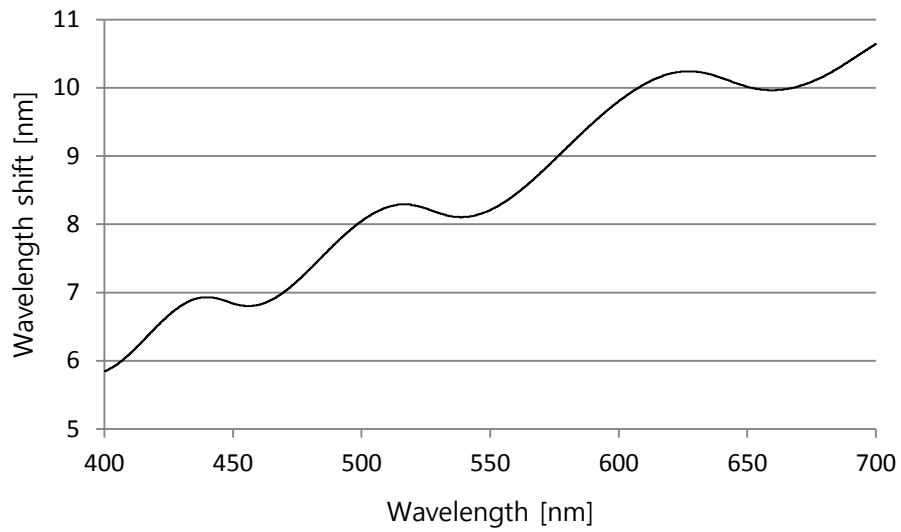
<그림 4.3 입사각에 따른 총 반사 계수의 위상(SiO_2 1000 nm)>



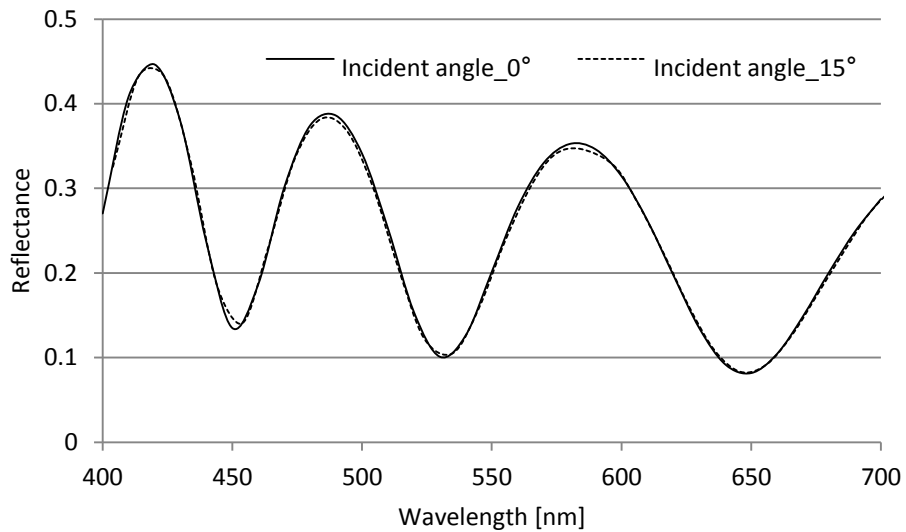
<그림 4.4 <그림 4.2> 의 점선 표시 영역 확대>



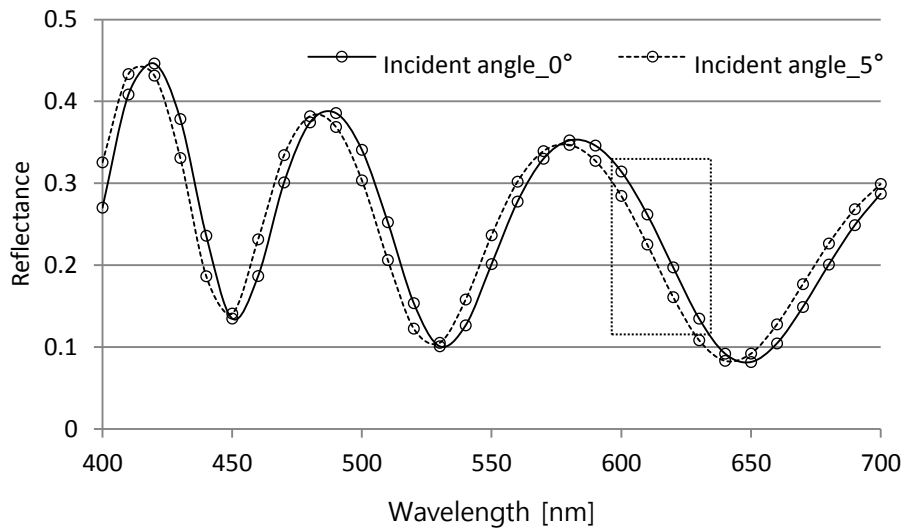
<그림 4.5 <그림 4.3> 의 점선 표시 영역 확대 >



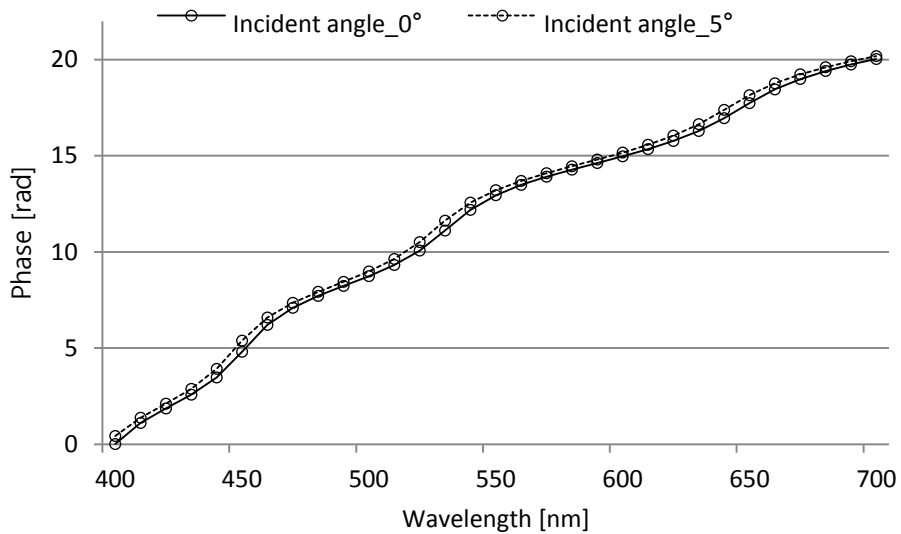
<그림 4.6 총 반사 계수의 위상을 이용하여 구해진 파장 축 오프셋>



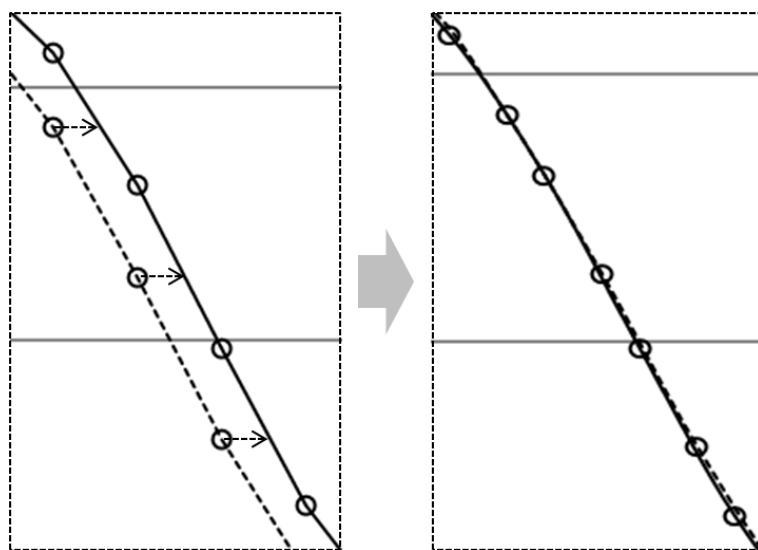
<그림 4.7 파장 축 오프셋이 적용되어 중첩된 반사도 신호>



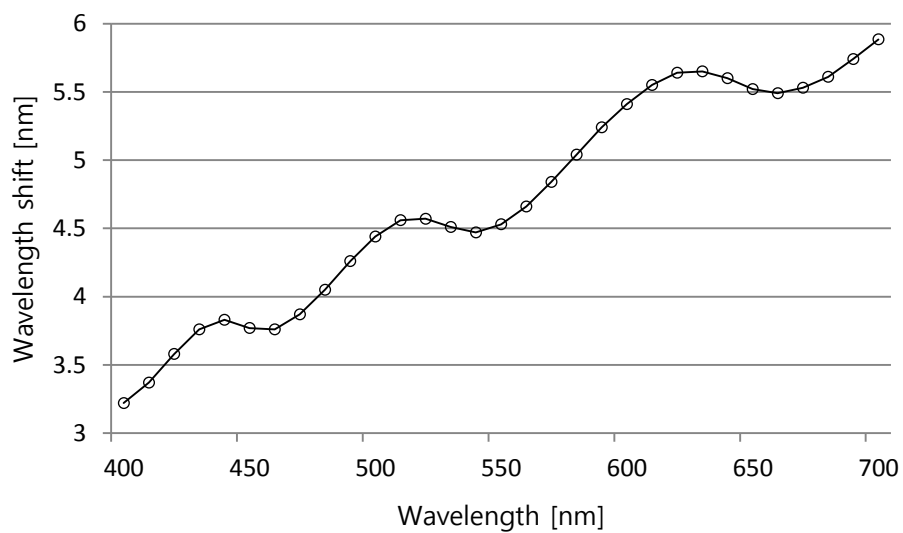
<그림 4.8 입사각에 따른 총 반사 계수의 크기 (10 nm interval)>



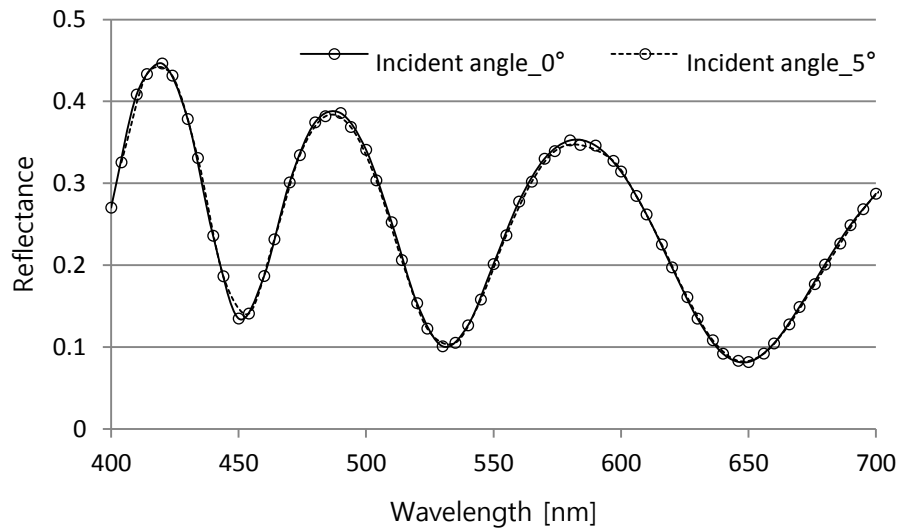
<그림 4.9 입사각에 따른 총 반사 계수의 위상 (10 nm interval)>



<그림 4.10 <그림 4.8> 의 점선 표시 영역 확대 >



<그림 4.11 위상을 이용하여 구해진 파장 축 오프셋 (10 nm interval)>



<그림 4.12 파장 축 오프셋이 적용되어 중첩된 반사도 신호 (10 nm interval)>

4.2.2. 가변 조리개를 이용한 다중 반사도 신호 획득

다중 반사도 중첩법에서는 서로 다른 입사각을 갖는 반사도 신호를 이용하여 파장 분해능을 개선하는데, 본 절에서는 서로 다른 입사각을 갖는 반사도 신호를 획득하는 방법에 대해 알아보하고자 한다.

<그림 4.13> 은 광원이 대물 렌즈를 통과하여 측정 대상에 입사되는 과정을 나타낸다. 대물 렌즈를 통과한 광원은 광 축 중심으로부터의 거리에 따라 특정 입사각을 갖는 상태로 입사되는데 광 축 중심으로부터 동일한 거리에 놓인 위치에서는 동일한 입사각을 가지며 광학계의 구성에 따라 최대 입사각 θ_M 을 갖는다. 반사도 신호의 수학적 모델에서는 광학계를 대표 할 수 있는 하나의 입사각 값이 사용되므로 <그림 4.14> 와 같이 광 축 중심으로부터의 거리에 따른 전체 입사각을 반영할 수 있는 등가 입사각 θ_{eff} 을 구할 필요가 있으며 <그림 4.15> 및 식 (4.6) 은 등가 입사각을 구하는 과정을 보여준다.

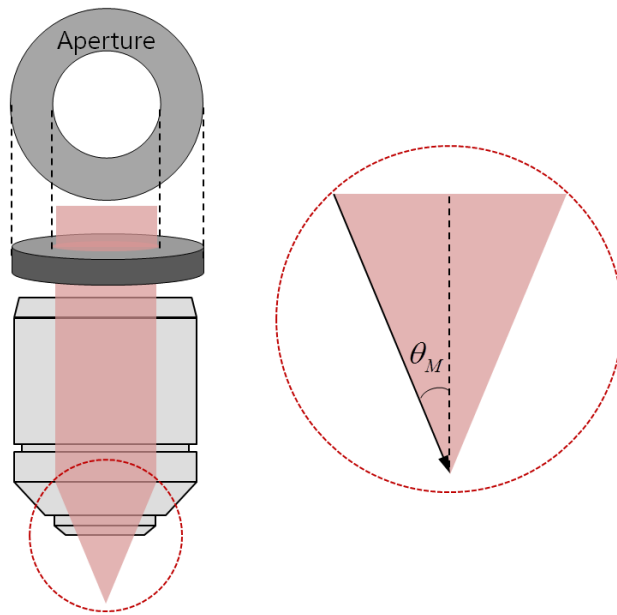
$$\cos \tilde{\theta}_2 = \frac{\int_0^{\theta_M} (2\pi L \cdot \sin \phi)(L \cdot d\phi) \cos \theta_2}{\int_0^{\theta_M} (2\pi L \cdot \sin \phi)(L \cdot d\phi)} \quad (4.6)$$

일반적으로 광원의 입사각은 <그림 4.13> 과 같이 광원의 이동 경로에 광원의 투과를 막을 수 있는 조리개를 배치하여 조절된다. 예로 <그림 4.16> 과 같이 내부 원의 직경이 다른 조리개를 사용하는 경우 상대적으로 내부 직경이 큰 조리개는 내부 직경이 작은 조리개에 비해 입사되는 광원이 큰 입사각을 갖게 한다. 따라서 광원의 이동 경로에 배치되는 조리개의 내부 직경을 변경하면 측정 대상에 입사되는 광원의 입사각이 달라지고 이러한 방법으로 얻어진 다중 반사도 신호는 파장 분해능을 개선하는데 사용 될 수 있다.

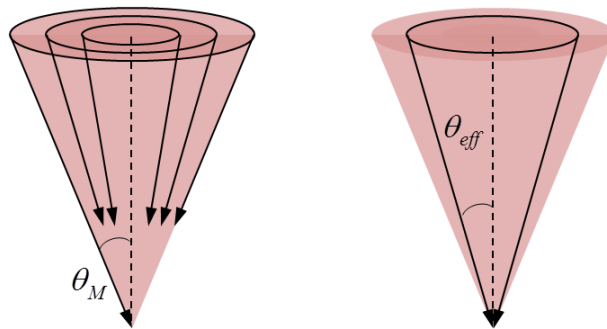
다음으로 조리개의 기하학적 구조와 그에 따른 반사도 신호의 파장 축 평행 이동 간의 관계에 대해 알아보도록 한다. 조리개의 내부 직경은 입사되는 광원의 입사각에 영향을 주고 결과로 반사도 신호 간의 파장 축 오프셋을 유발한다. 이때 적절한 파장 축 오프셋을 유발하려면 알맞은 내부 직경을 갖는 조리개가 사용되어야 하며 이를 위해서는 조리개의 내부 직경과 파장 축 오프셋 간의 관계를 파악할 필요가 있다. <그림 4.17> 과 같이 가변 조리개를 사용하여 서로 다른 입사각을 갖는 두 반사도 신호 사이에 λ_k 의 파장에서 $\Delta\lambda$ 의 파장 축 오프셋이 발생하게 하기 위한 가변 조리개를 설계하고자 한다. 가변 조리개는 내부 직경에 따라 각각 θ_1, θ_2 의 등가 입사각을 갖고 이에 해당하는 위상 $\psi(\theta_1, \lambda_k), \psi(\theta_2, \lambda_k)$ 을 갖게 된다. 마찬가지로 식 (4.5) 와 같이 서로 다른 입사각을 갖는 두 위상을 같게 만드는 $\Delta\lambda$ 를 탐색하기 위해 식 (4.7) 의 최소 자승법을 이용하도록 한다.

$$\chi^2 = |\psi(\theta_1, \lambda_k) - \psi(\theta_2, \lambda_k + \Delta\lambda)|^2 \quad (4.7)$$

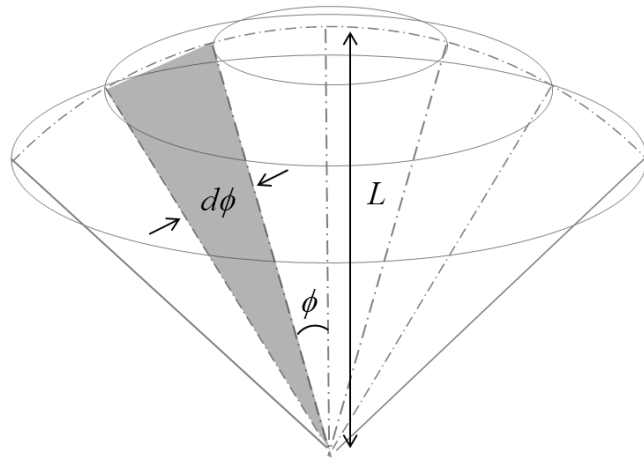
<그림 4.18> 은 $\theta_1 = 16^\circ$, $\lambda_k = 550 \text{ nm}$ 인 경우 최소 자승법을 이용하여 파장 축 오프셋과 입사각 간의 관계를 구한 결과로 해당 관계를 통해 적절한 파장 축 오프셋을 위한 가변 조리개의 내부 직경 설계가 가능하다. 예로 16° 의 입사각을 갖는 가변 조리개를 사용하여 얻어진 반사도 신호 대비 500 nm 파장에서 5 nm 만큼 파장 축으로 평행 이동된 반사도 신호를 얻기 위해서는 약 19.4° 의 입사각을 갖는 가변 조리개를 설계해야 한다.



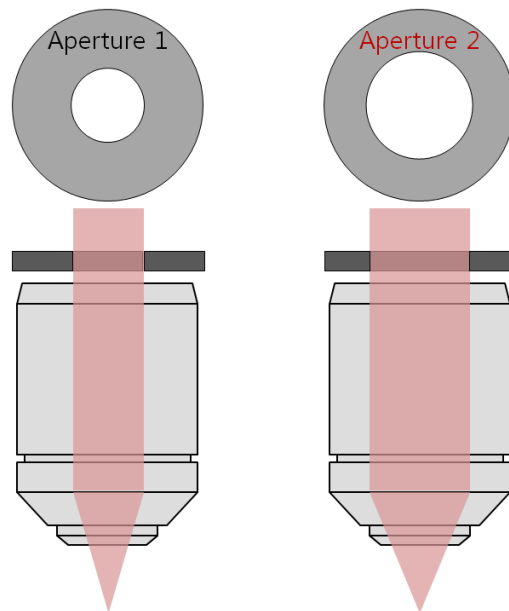
<그림 4.13 대물 렌즈를 통과하여 입사되는 광원>



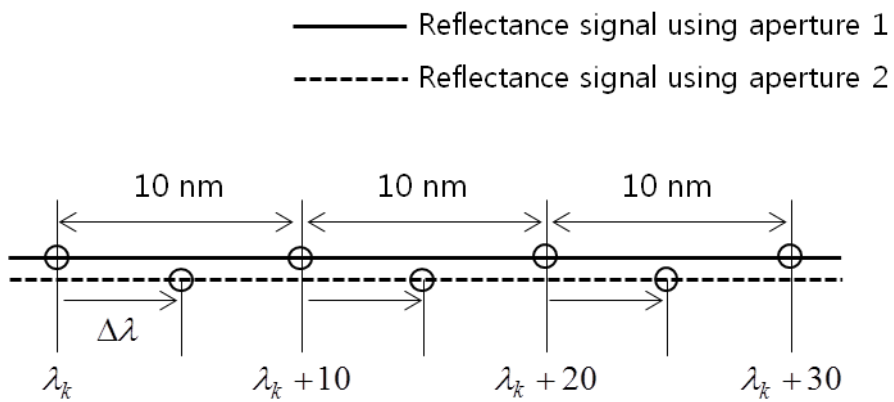
<그림 4.14 등가 입사각의 개념>



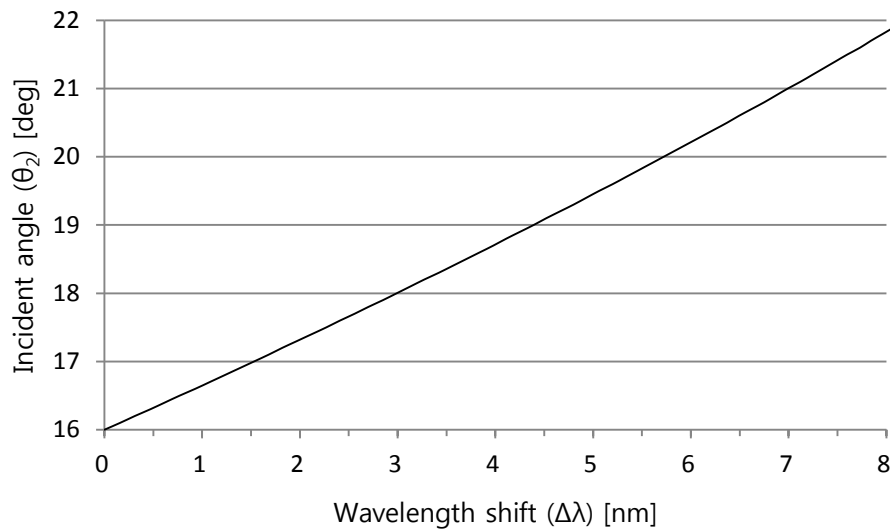
<그림 4.15 등가 입사각 산출>



<그림 4.16 조리개를 이용한 입사각 조절>



<그림 4.17 가변 조리개의 설계>



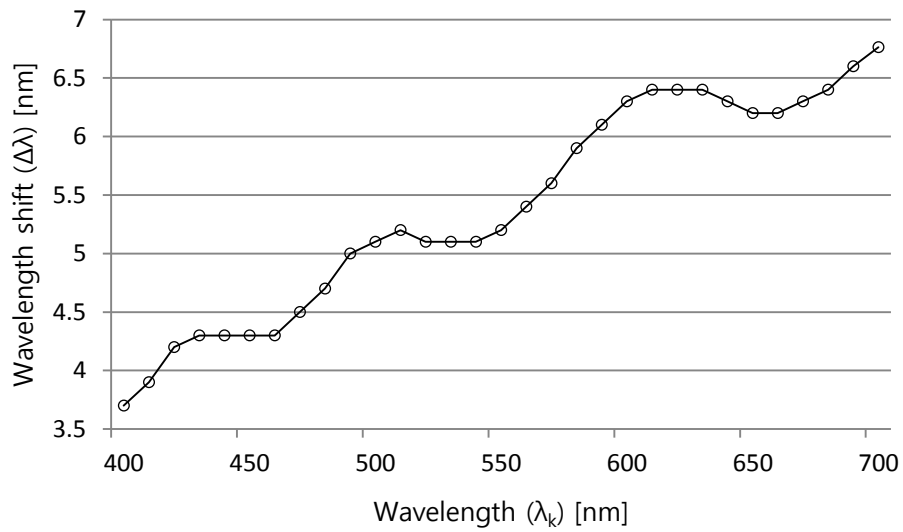
<그림 4.18 파장 축 오프셋과 입사각 간의 관계>

4.2.3. 다중 반사도 신호 중첩

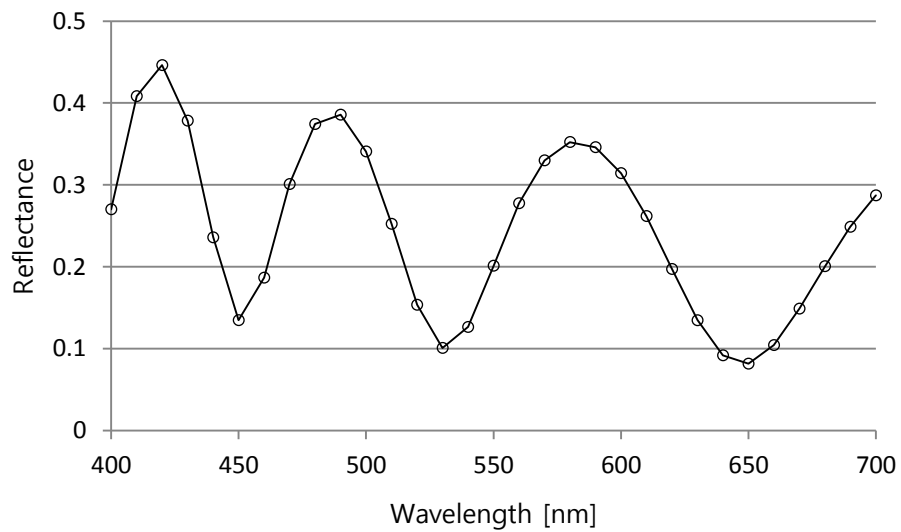
앞 절에서는 내부 직경이 다른 조리개를 사용하여 서로 다른 입사각을 갖는 다중 반사도 신호를 얻는 방법에 대해 살펴보았다. 본 절에서는 얻어진 다중 반사도 신호에 파장 축 오프셋을 보상하여 다중 반사도 신호가 중첩될 수 있도록 유도하는 과정을 살펴보려고 한다.

가변 조리개를 설계하는 과정에서와 마찬가지로 식 (4.5) 와 같이 서로 다른 입사각을 갖는 두 위상을 같게 만드는 $\Delta\lambda$ 를 탐색하기 위해 식 (4.7) 의 최소 자승법을 이용하도록 한다. <그림 4.19> 는 $\theta_1 = 16^\circ, \theta_2 = 19.4^\circ$ 인 경우 최소 자승법을 이용하여 파장 λ_k 에서의 파장 축 오프셋 $\Delta\lambda$ 를 구한 결과이다. 서로 다른 입사각을 갖는 두 반사도 신호를 중첩시키기 위해 전체 파장 범위에서 균일한 파장 축 오프셋을 적용시키는 것이 아니라 파장 별로 적용되어야 하는 파장 축 오프셋 크기에 차이가 있음을 알 수 있다. 예로 500nm 의 파장에서는 5 nm 의 파장 축 오프셋을, 600 nm 의 파장에서는 6nm 의 파장 축 오프셋을 적용시켜야 한다.

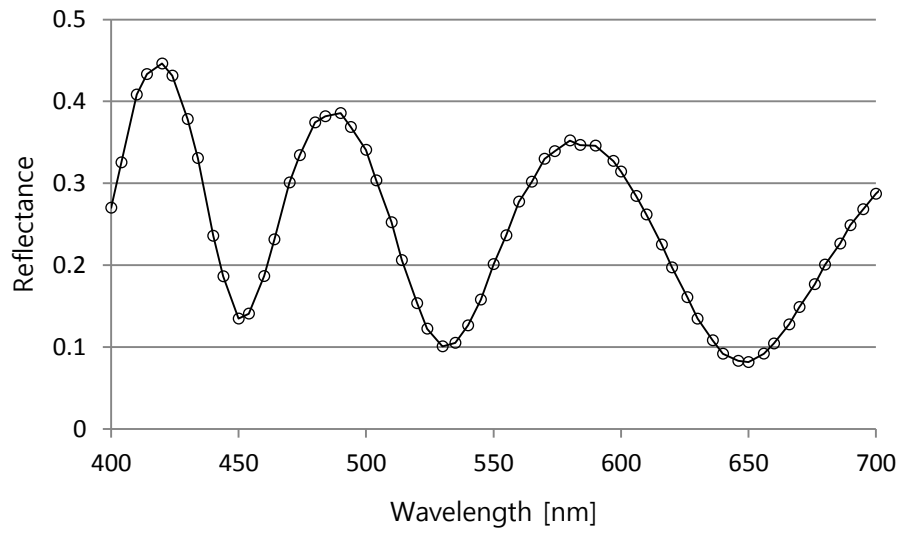
<그림 4.20> 은 400 - 700 nm 의 파장 범위에서 총 31개의 밴드 패스 필터를 사용하는 기존 이미징 분광 반사계로부터 얻어지는 것과 동일한 파장 분해능을 갖는 반사도 신호의 모델링 결과이며 파장 축으로 총 31개의 데이터가 얻어져 10 nm 의 파장 분해능을 보인다. <그림 4.21> 은 각각 기존과 동일한 파장 분해능을 갖는 두 반사도 신호를 중첩시키고 중첩된 전체 데이터를 이용하여 하나의 반사도 신호를 구성한 결과이다. 동일한 파장 범위에서 각각의 반사도 신호로부터 얻어진 총 62개의 데이터가 확보되어 평균적으로 5 nm 의 파장 분해능을 보인다.



<그림 4.19 파장 별 파장 축 오프셋>



<그림 4.20 기존 이미징 분광 반사계 시스템에서 얻어지는 파장 분해능>

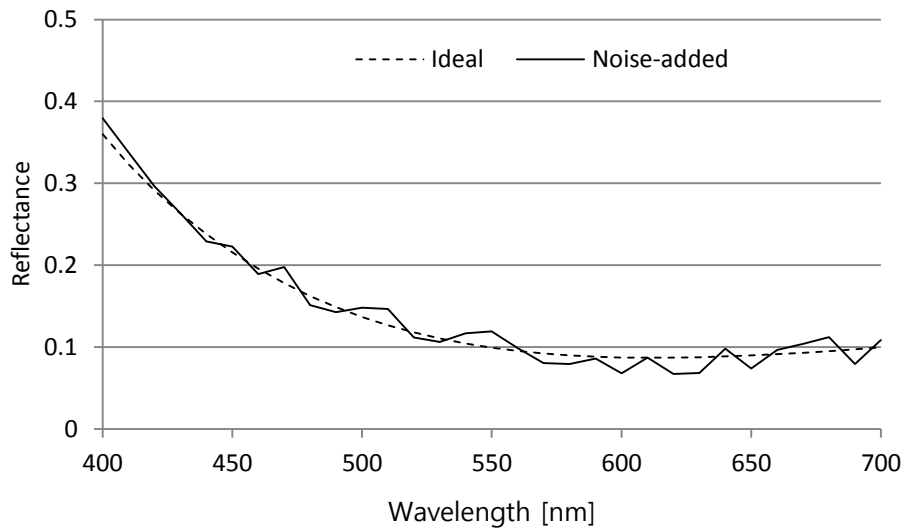


<그림 4.21 다중 반사도 중첩법에 의해 개선된 파장 분해능>

4.3. 모의 실험을 통한 시스템 최적화

다중 반사도 중첩법에서 가변 조리개의 적절한 설계와 정확한 다중 반사도 신호 중첩이 이루어진다면, 중첩에 이용되는 반사도 신호의 개수를 더욱 증가시키는 방법으로 파장 분해능 또한 비례하여 개선시킬 수 있다. 예로 서로 다른 입사각을 갖는 2 개의 반사도 신호를 중첩시키면 앞 절에서 살펴본 바와 같이 5 nm 의 파장 분해능이 얻어지고, 5 개의 반사도 신호를 중첩시키면 2 nm 의 파장 분해능이 얻어지게 된다. 본 절에서는 중첩되는 반사도 신호의 개수에 따른 이미징 분광 반사계의 성능 개선을 모의 실험을 통해 분석하여 시스템 최적화를 진행하고자 한다.

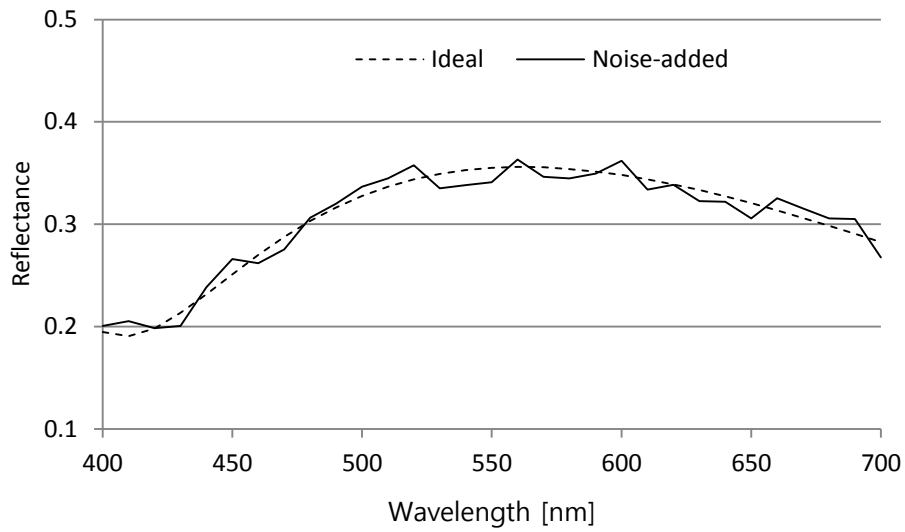
모의 실험에서는 Si 기판 상 두께 100 nm, 200 nm, 500 nm, 1000 nm 인 SiO_2 박막이 형성되어 있는 경우 파장 분해능에 따른 반복도 경향을 관찰한다. 3장에서와 같이 모델링된 반사도 신호에 노이즈를 추가하고, 노이즈가 추가된 신호를 실제 반사도 신호로 가정하여 비선형 피팅법을 통해 두께 결과값을 얻는 과정을 반복한다. <그림 4.22>, <그림 4.23>, <그림 4.24>, <그림 4.25> 는 각각의 두께에서 모델링된 신호에 노이즈가 추가된 반사도를 나타내며 파장 분해능에 따른 반복도 모의 실험 결과는 <그림 4.26> 과 같다. 모의 실험 결과에서 가로축은 파장 분해능에 해당되는데 기존의 이미징 분광 반사계에서 얻어지는 10 nm 의 파장 분해능에서부터 서로 다른 입사각을 갖는 10 개의 다중 반사도 신호를 중첩하여 확보할 수 있는 1 nm 의 파장 분해능에 이르는 동안의 반복 측정에 대한 반복도를 나타낸다. 두께 별 반복도의 절대값에는 다소간의 차이가 있지만 전반적으로 파장 분해능이 개선될수록 양호한 반복도를 보이다가 2 nm 이하의 파장 분해능 구간에서는 수렴하는 경향을 보인다.



<그림 4.22 모의 실험을 위해 노이즈가 추가된 반사도 신호 (두께 100 nm)>

<표 4.1 시스템 최적화를 위한 모의 실험 결과(두께 100 nm)>

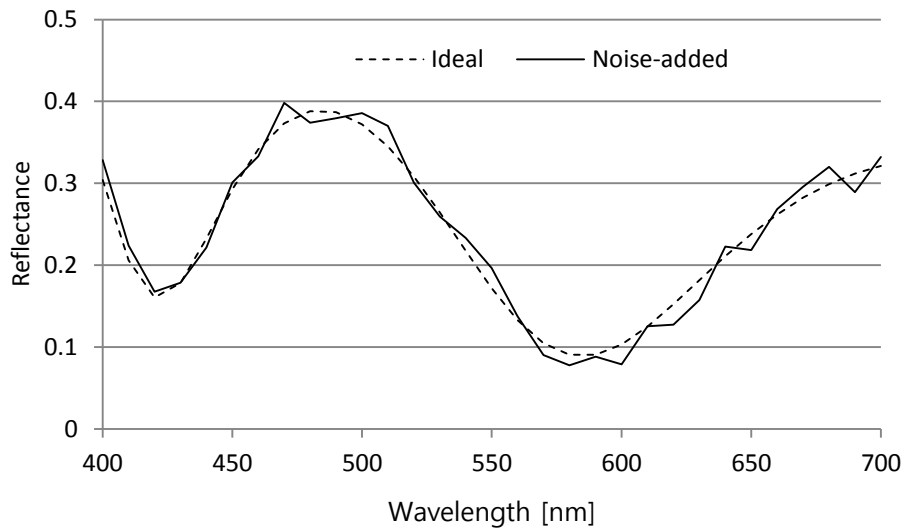
Number of reflectance	1	2	3	5	7	10
Wavelength Interval [nm]	10	5	3.3	2	1.5	1
Max thickness [nm]	101.2	99.6	99.5	99.1	99.1	98.9
Min thickness [nm]	94.8	94.5	96.0	97.1	96.6	96.9
Average thickness [nm]	97.4	97.7	98.1	98.1	98.3	98.1
3 STDEV [nm]	4.8	3.8	2.6	1.5	1.7	1.6



<그림 4.23 모의 실험을 위해 노이즈가 추가된 반사도 신호 (두께 200 nm)>

<표 4.2 시스템 최적화를 위한 모의 실험 결과(두께 200 nm)>

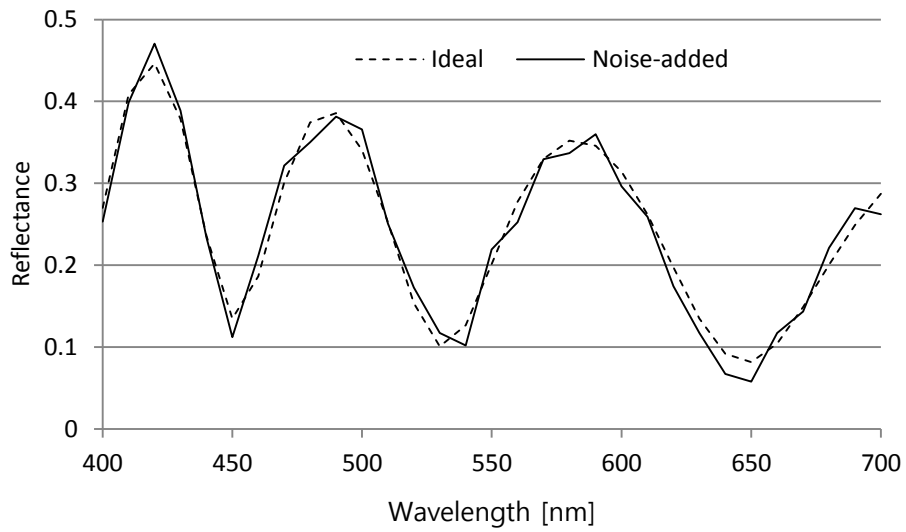
Number of reflectance	1	2	3	5	7	10
Wavelength Interval [nm]	10	5	3.3	2	1.5	1
Max thickness [nm]	191.5	191.5	190.5	190.5	190.5	190.5
Min thickness [nm]	187.5	188.5	188.5	188.5	189.5	189.5
Average thickness [nm]	189.6	189.8	189.8	189.5	189.8	189.7
3 STDEV [nm]	3.2	2.4	1.7	1.4	1.3	1.2



<그림 4.24 모의 실험을 위해 노이즈가 추가된 반사도 신호 (두께 500 nm)>

<표 4.3 시스템 최적화를 위한 모의 실험 결과(두께 500 nm)>

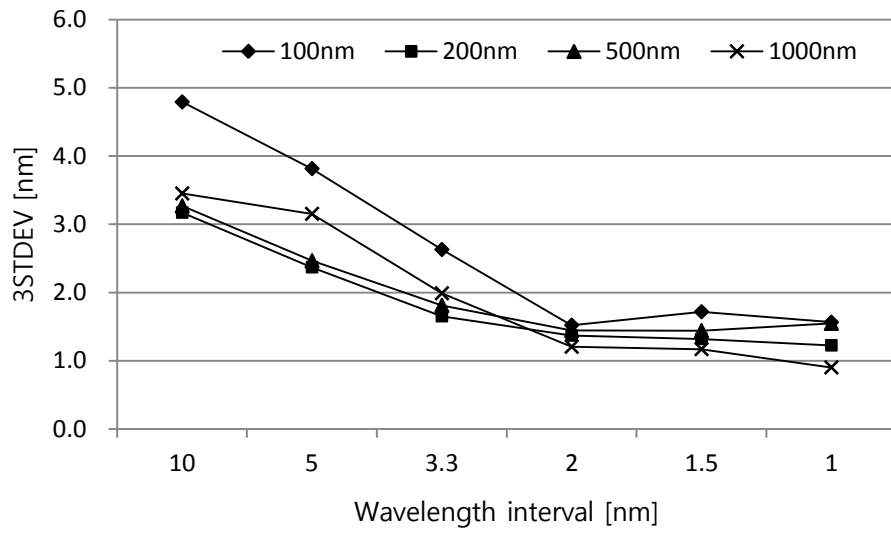
Number of reflectance	1	2	3	5	7	10
Wavelength Interval [nm]	10	5	3.3	2	1.5	1
Max thickness [nm]	500.5	500.5	499.5	499.5	499.5	499.5
Min thickness [nm]	496.5	497.5	497.5	497.5	497.5	497.5
Average thickness [nm]	498.6	499.1	498.7	498.6	498.6	498.7
3 STDEV [nm]	3.3	2.5	1.8	1.4	1.4	1.5



<그림 4.25 모의 실험을 위해 노이즈가 추가된 반사도 신호 (두께 1000 nm)>

<표 4.4 시스템 최적화를 위한 모의 실험 결과(두께 1000 nm)>

Number of reflectance	1	2	3	5	7	10
Wavelength Interval [nm]	10	5	3.3	2	1.5	1
Max thickness [nm]	994.4	994.5	993.5	993.5	993.5	993.5
Min thickness [nm]	990.5	990.5	991.5	992.5	991.5	992.5
Average thickness [nm]	992.3	992.4	992.6	992.7	992.5	992.6
3 STDEV [nm]	3.5	3.2	2.0	1.2	1.2	0.9



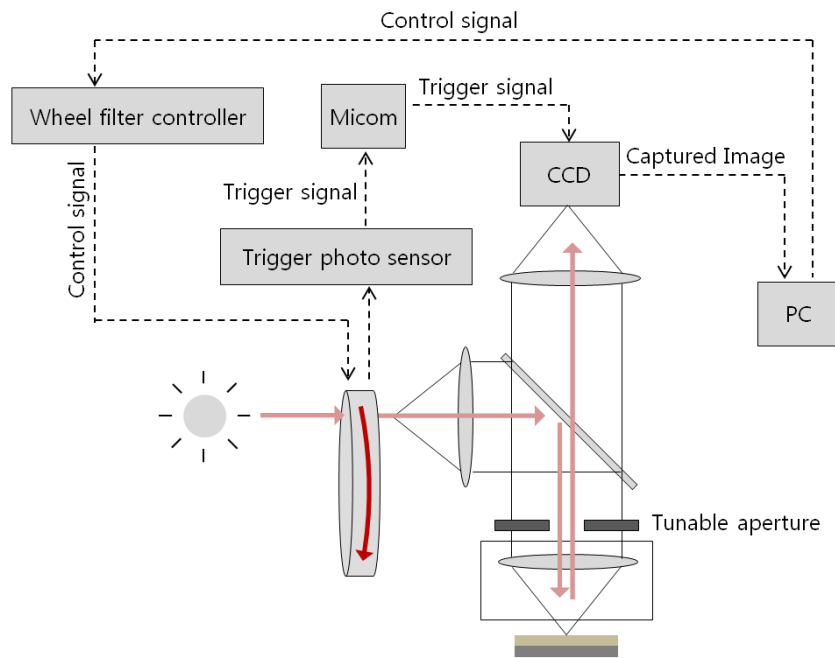
<그림 4.26 파장 분해능에 따른 반복도 모의 실험 결과>

5. 이미징 분광 반사계 시스템 구성

5.1. 개요

본 장에서는 실험을 위해 구성된 이미징 분광 반사계 시스템의 각 요소들과 이들의 상세 사양에 대해 살펴보고자 한다.

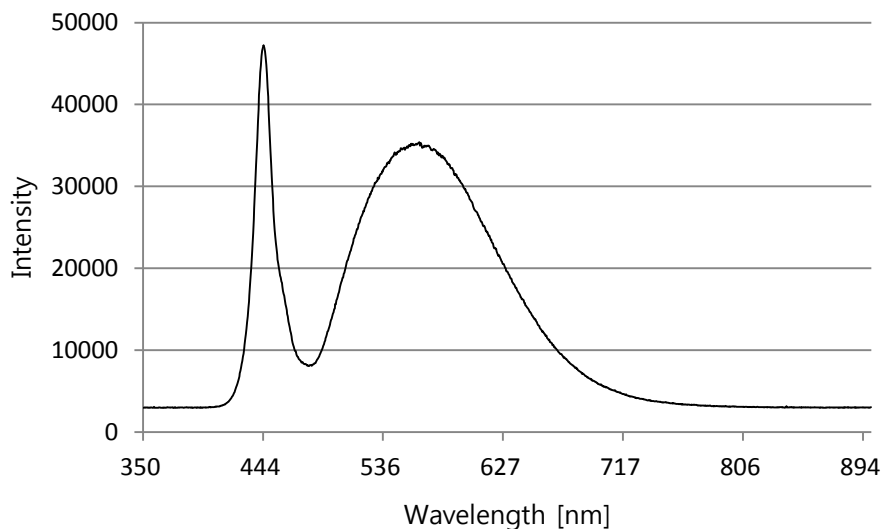
<그림 5.1> 은 이미징 분광 반사계 시스템의 구성도를 나타내며 광원, 광원 필터링 시스템, 광학계 및 대물렌즈, 가변 조리개, 디텍터 등으로 구성됨을 알 수 있다. 컨트롤러에 의해 회전형 필터가 구동되면서 광학계로 입사되는 빛의 파장이 시간에 따라 순차적으로 변경되어 파장 주사가 진행된다. 파장 주사가 진행되는 동안 광 센서 (Photo sensor) 로부터 출력된 신호에 의해 2차원 CCD 배열을 갖는 카메라를 이용하여 각 중심 파장에서의 이미지를 얻고, 결과로 여러 파장에서 획득된 다수의 이미지가 축적된 이후 분석을 위해 컴퓨터로 전송된다. 이 때 가변 조리개는 광원의 이동 경로에 배치되어 광원의 입사각을 조절하는 역할을 수행한다.



<그림 5.1 이미징 분광 반사계 시스템의 구성도>

5.2 광원

분광 반사계가 반도체 및 디스플레이 산업에서 활용되는 경우, 불투명한 물질의 두께 측정과 같은 한정적인 상황을 제외하면 대부분 가시광 영역의 백색광 광원이 사용된다. 가시광 영역에서는 굴절률과 같이 두께 측정을 위해 요구되는 물질의 특성이 가장 잘 알려져 있고 파장 별 반사도가 특징적으로 잘 나타나며 광학 부품을 쉽게 구성할 수 있기 때문이다. 일반적으로 널리 사용되는 가시광 영역의 백색광 광원으로는 텅스텐-할로젠 (Tungsten-halogen) 광원과 LED (Light Emitting Diode) 광원이 있다. 본 연구에서는 LED 광원이 사용되었으며 <그림 5.2> 와 같이 약 420 - 750 nm 의 파장 범위를 갖는다.



<그림 5.2 실험에 사용된 LED 광원의 스펙트럼>

5.3 광학계 및 대물렌즈

최근의 분광 반사계 연구에서 구성된 시스템의 경우 반도체 및 디스플레이 산업에서의 활용을 위해 현미경 광학계가 주로 제작되어 미세 패턴 또는 극히 좁은 영역을 측정하기 위한 목적으로 사용되었다. 본 연구에서도 마찬가지로 미세 패턴의 측정을 위한 현미경 광학계가 구성되었고 50 배 대물 렌즈가 사용되었다.

이미징 분광 반사계에서는 광원 필터링 시스템을 통해 광학계로 입사되는 빛의 파장이 시간에 따라 순차적으로 변하는데 이때 파장에 따른 렌즈의 굴절률 차이에 의해 수차 (Aberration) 가 발생하게 된다. 긴 파장의 빛일수록 렌즈를 통과한 뒤에 다른 파장의 빛보다 초점이 렌즈에서 먼 쪽으로 맺히게 되는데 결과적으로 특정 파장에서 이미지가 덜 선명해 보이게 된다. 이미징 분광 반사계에서는 각 파장에서 축적된 이미지가 곧 파장 별 반사도 이므로 수차는 반사도 신호의 왜곡을 이어져 오계측을 유발할 수 있다. 따라서 본 연구에서는 수차를 줄인 대물 렌즈를 사용하였으며 사양은 <표 5.1> 과 같다.

<표 5.1 실험에 사용된 대물 렌즈의 사양>

Item	Specification
Magnification	50x
Numerical aperture	0.5
Working distance [mm]	10.6 mm
Depth of focus [um]	2.5

5.4 CCD 카메라

이미징 분광 반사계에서는 두께 형상 측정을 위해 2차원 배열을 갖는 디텍터가 필수적이다. 본 연구에서는 CCD 카메라를 디텍터로 사용하는데 CCD 카메라는 영상을 전기 신호로 변환하여 디지털 데이터의 형태로 메모리 등의 기억 매체에 저장한다. CCD 카메라는 가격이 비싸고 전력 소모가 크지만 노이즈나 잔상 처리가 뛰어난 장점을 앞세워 광범위한 분야에서 효과적으로 활용되고 있다.

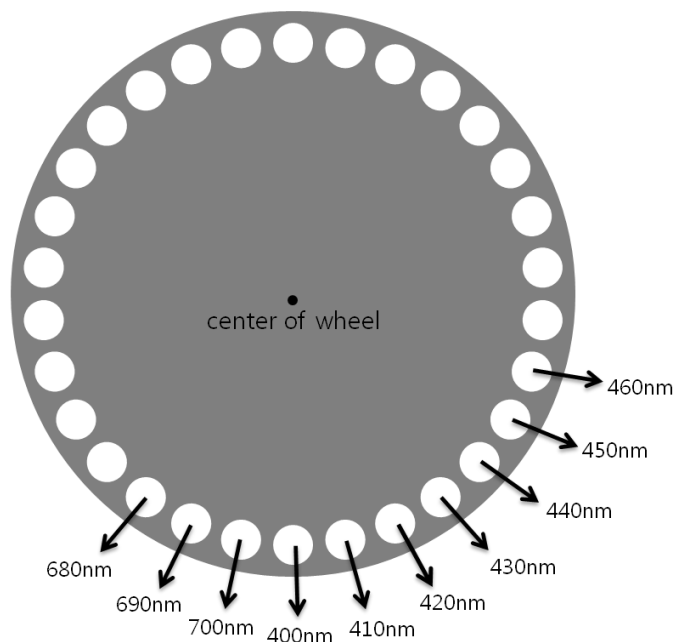
<표 5.2> 는 본 연구에서 사용된 CCD 카메라의 사양을 나타낸다. 640 x 480 의 배열을 갖는 픽셀로 구성되며 광량이 충분한 경우 초당 264 개의 이미지를 획득할 수 있는 고속 카메라이다. 실험에 사용된 50 배 대물 렌즈와의 조합을 통해 이미징 분광 반사계 시스템은 0.148 μm 의 픽셀 분해능과 94 x 71 μm 의 측정 영역을 갖게 된다.

<표 5.2 실험에 사용된 CCD 카메라의 사양>

Item	Specification
Resolution	640 x 480
Pixel size [μm]	7.4
Data bit	8 bit
Frame rate [fps]	264

5.5 회전형 필터

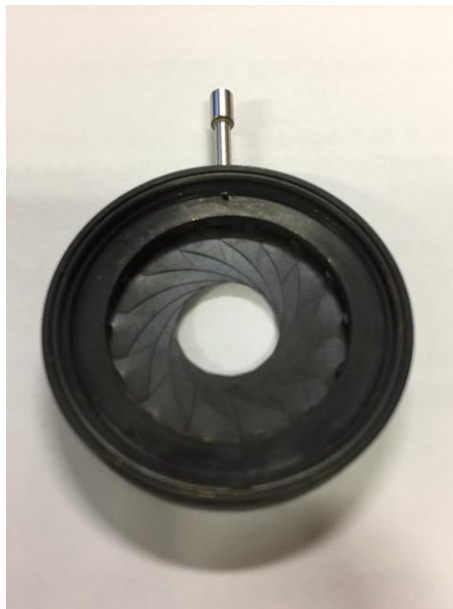
본 연구에서는 광원 필터링 시스템으로 강건성이 뛰어난 장점이 있는 회전형 필터를 사용한다. 회전형 필터는 회전 가능하도록 구성된 원판에 다수의 밴드 패스 필터를 설치하고 이를 광원으로부터 나온 빛이 지나가는 광경로에 위치시킨다. 빛은 밴드 패스 필터를 통과한 이후 좁은 밴드폭을 갖는 준 단파장 광원으로 필터링 되는데 이때 원판을 회전시키면 빛이 밴드 패스 필터를 순차적으로 통과하게 되어 시간에 따라 파장을 주사하는 효과를 얻게 된다. <그림 5.3> 은 실험에 사용된 회전형 필터의 구성도를 나타내며 400 - 700 nm의 파장 범위에서 10 nm 간격으로 총 31개의 밴드 패스 필터를 사용하며 파장 축으로 총 31개의 데이터가 얻어진다.



<그림 5.3 실험에 사용된 회전형 필터 구성도>

5.6 가변 조리개

회전형 필터가 사용되는 이미징 분광 반사계의 파장 분해능이 낮은 문제에 대한 해결 방안으로 본 연구에서는 다중 반사도 중첩법을 제시하였다. 다중 반사도 중첩법에서는 서로 다른 입사각을 갖는 반사도 신호를 획득해야 하는데 이를 위해 가변 조리개를 사용한다. 가변 조리개에서는 <그림 5.4>와 같이 셔터의 개폐에 따라 조리개 직경의 변경이 가능하며 대물 렌즈의 상단에 위치해 측정 대상에 입사되는 빛의 입사각을 조절하는 역할을 한다.



<그림 5.4 실험에 사용된 가변 조리개>

6. 실험

6.1. 개요

이미징 분광 반사계를 이용하여 박막의 두께를 측정함에 있어 다중 반사도 중첩법의 도입이 측정 성능에 미치는 영향을 평가하는 실험을 수행하여 제안된 방법의 효용성을 확인하고자 한다.

이미징 분광 반사계에서는 면적에 대한 두께 형상을 획득하기 위하여 CCD 배열을 갖는 카메라를 디텍터로 사용한다. 결과, 센서 성능의 한계로 인하여 반사도 신호에 노이즈가 많으며 이는 측정 성능의 저하로 이어지게 된다. 반면 스펙트로미터를 디텍터로 사용하는 분광 반사계의 경우 우수한 센서 성능에 의해 노이즈가 거의 존재하지 않는 반사도 신호가 얻어지며 보다 정밀한 측정 결과의 획득이 가능하다. 이후 진행되는 다음의 실험에서는 분광 반사계를 통해 얻어진 측정값을 이미징 분광 반사계를 이용한 실험 결과에 대한 기준값으로 활용하도록 한다.

- ① 구성된 이미징 분광 반사계 시스템을 이용하여 서로 다른 입사각을 갖는 다중 반사도 신호를 획득하고 다중 반사도 신호의 중첩을 통한 파장 축 분해능의 개선을 평가한다.
- ② 다양한 두께를 갖는 측정 대상에 대해 반복 측정을 진행하여 파장 축 분해능의 개선에 따른 두께 측정 반복도 경향을 분석한다.
- ③ 두께가 두꺼운 측정 대상에 대해 측정을 진행하여 파장 축 분해능에 따른 후막 두께 측정 성능을 평가한다.

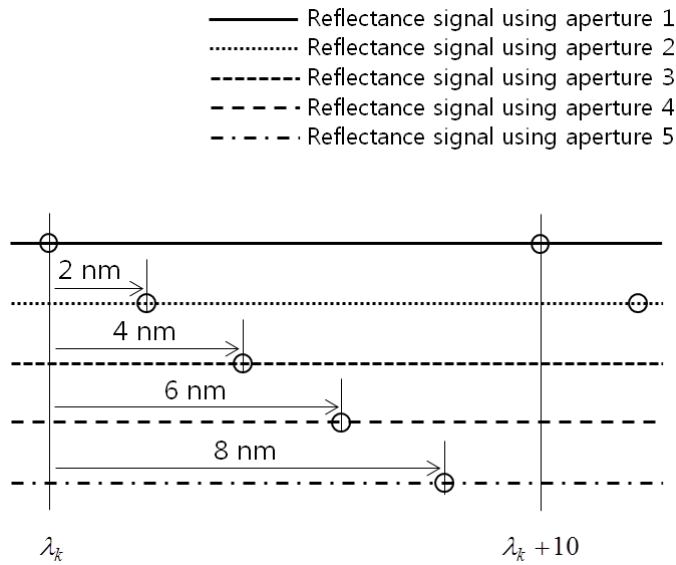
6.2. 다중 반사도 신호 중첩에 따른 파장 분해능 개선

본 절에서는 서로 다른 입사각을 갖는 다중 반사도 신호를 얻고 다중 반사도 신호의 중첩을 통한 파장 축 분해능의 개선을 평가하고자 한다.

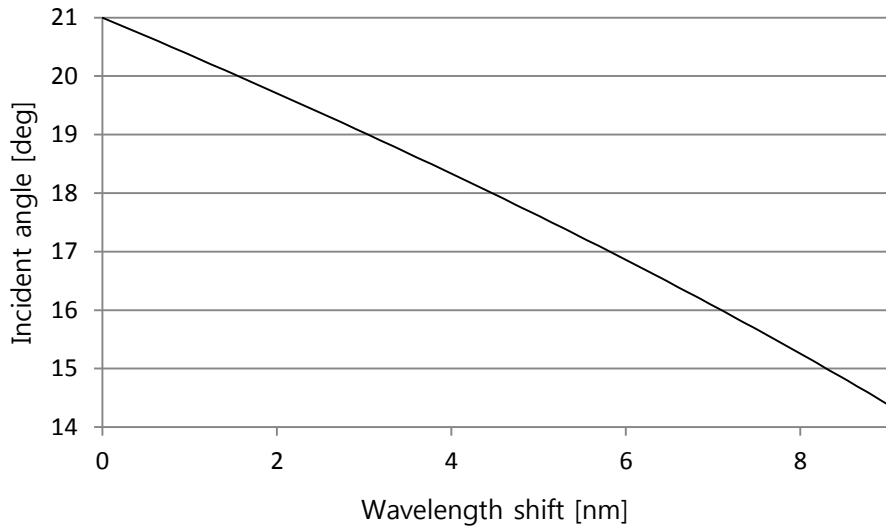
<그림 6.1> 은 실험에서 얻고자 하는 다중 반사도 신호의 구성을 나타낸다. 모의 실험을 통한 최적화 결과를 반영하여 5 가지의 서로 다른 직경을 갖는 가변 조리개를 이용하여 총 5 개의 다중 반사도 신호를 획득하면 결과적으로 약 2 nm 의 파장 축 분해능이 얻어질 것으로 예상할 수 있다. <그림 6.2> 는 입사각과 파장 축 오프셋 간의 관계를 이용하여 다중 반사도 신호 획득을 위한 가변 조리개의 직경을 설계하는 과정을 나타낸다. 입사각과 파장 축 오프셋 간의 관계를 통해 실험에 사용된 50 배 대물 렌즈의 최대 입사각인 21° 를 기준으로 각각 2 nm, 4 nm, 6 nm, 8 nm, 의 파장 축 오프셋을 일으키는 입사각을 구하고, 입사각과 렌즈의 기하학적 관계를 고려하여 가변 조리개의 직경이 결정될 수 있다. <표 6.1> 은 5 개의 다중 반사도 신호를 얻기 위한 가변 조리개의 설계 결과이다. 대물 렌즈의 최대 입사각을 기준으로 얻고자 하는 파장 축 오프셋 크기가 증가할수록 입사각 및 가변 조리개의 직경 차이도 커야 함을 알 수 있다.

<그림 6.3> 은 Si 기판 상 100 nm 의 두께를 갖는 SiO_2 박막이 형성되어 있는 시편에 대해 설계된 가변 조리개를 이용하여 각각의 가변 조리개 직경에서 얻어진 다중 반사도 신호를 나타낸다. 측정에 이용된 가변 조리개의 직경이 작을수록 파장 축 오프셋 크기가 큰 반사도 신호가 얻어진 것을 알 수 있다. <그림 6.4> 는 얻어진 다중 반사도 신호에 수학적으로 계산된 파장 축 오프셋을 보상하여 다중 반사도 신호를 중첩시킨 결과이다. 모든 다중 반사도 신호가 파장 축 평행 이동 없이 잘 중첩되었음을 보여준다. 마지막으로 <그림 6.5> 는 중첩된 다중 반사도 신호를 통합하여 하나의 반사도 신호를 구성한 최종 반사도 신호이다. 다중 반사도 신호 중첩을 통해 <그림 6.3> 의 기존 반사도 신호 대비 파장 축 분해능이 개선된 결과를 확인할 수 있다.

<그림 6.6> - <그림 6.8>, <그림 6.9> - <그림 6.11>, <그림 6.12> - <그림 6.14>는 각각 Si 기판 상 두께 200 nm, 500 nm, 1000 nm SiO₂ 박막이 형성되어 있는 시편에 대해 얻어진 실험 결과이다. 100 nm 의 두께를 갖는 시편에 대한 결과와 마찬가지로 설계된 가변조리개를 이용하여 얻어진 다중 반사도 신호, 파장축 오프셋이 보상되어 중첩된 결과, 중첩된 다중 반사도 신호를 통합하여 하나의 반사도 신호를 구성한 최종 반사도 신호를 나타낸다. 모든 두께의 시편에 대해 기존 반사도 신호 대비 파장축 분해능이 개선된 결과를 확인할 수 있다.



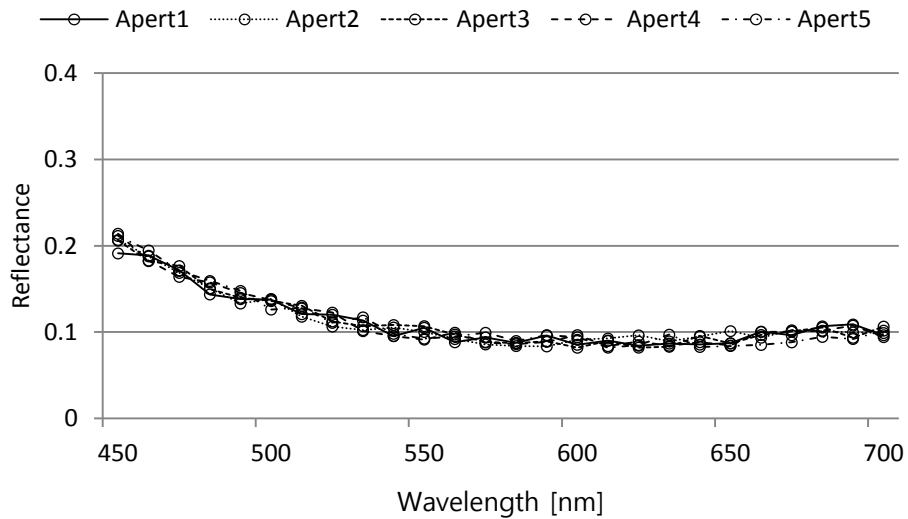
<그림 6.1 모의 실험 결과를 반영한 다중 반사도 신호 구성>



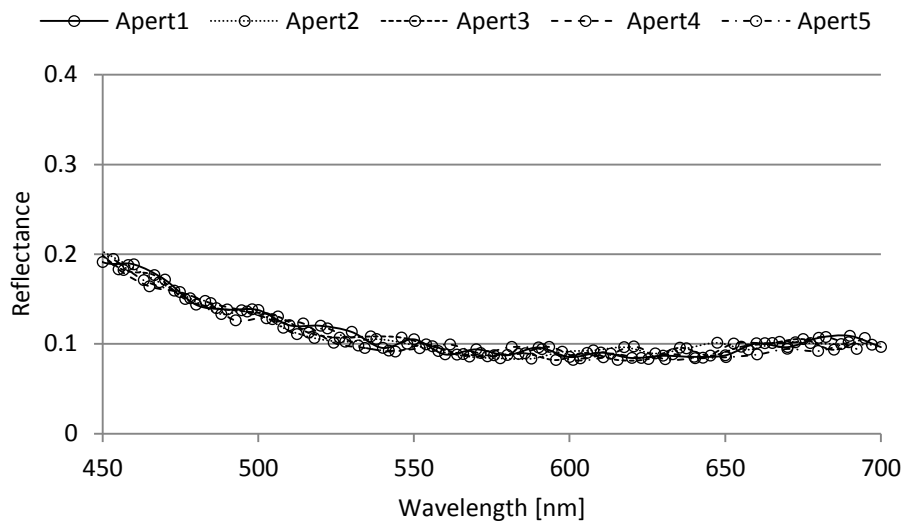
<그림 6.2 다중 반사도 신호 획득을 위한 가변 조리개 설계>

<표 6.1 가변 조리개 설계 결과>

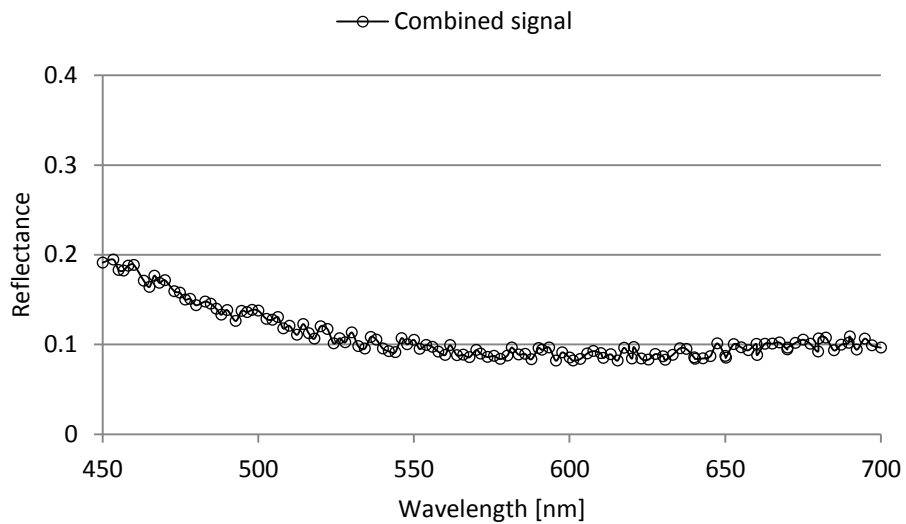
	Aperture1	Aperture2	Aperture3	Aperture4	Aperture5
Wavelength shift [nm]	-	2	4	6	8
Effective incident angle [deg]	21	19.6	18.3	16.8	15.2
Max. incident angle[deg]	30	28.1	26.4	24.4	22.2
Numerical aperture	0.5	0.47	0.44	0.41	0.38
Diameter of aperture [mm]	8.8	8.2	7.6	6.9	6.2



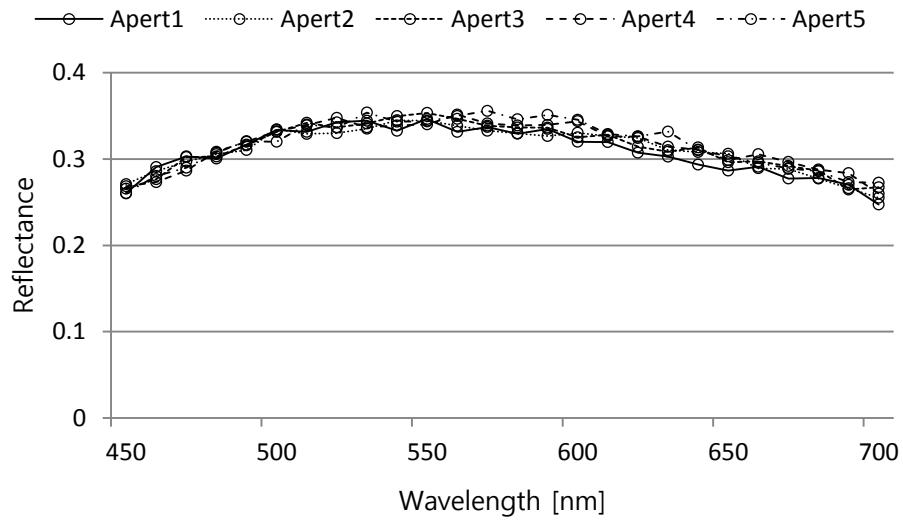
<그림 6.3 가변 조리개를 이용하여 획득된 다중 반사도 신호 (두께 100 nm)>



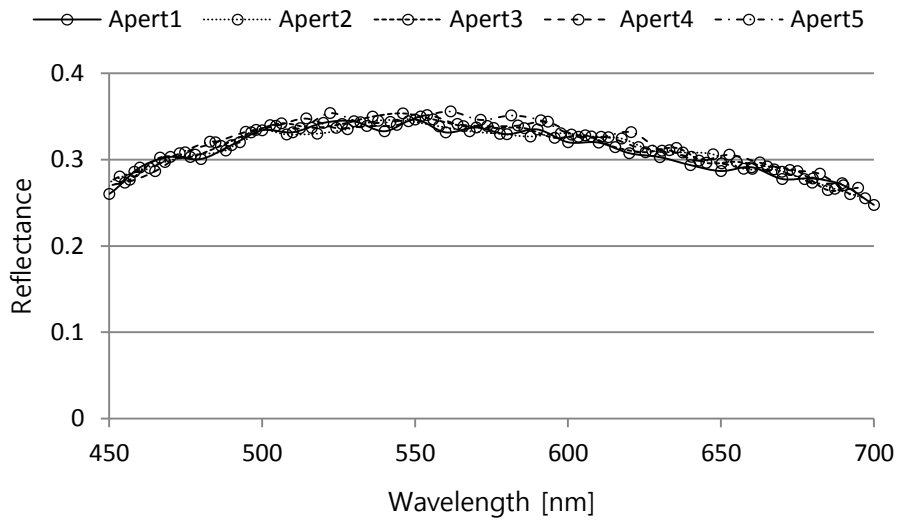
<그림 6.4 중첩된 다중 반사도 신호 (두께 100 nm)>



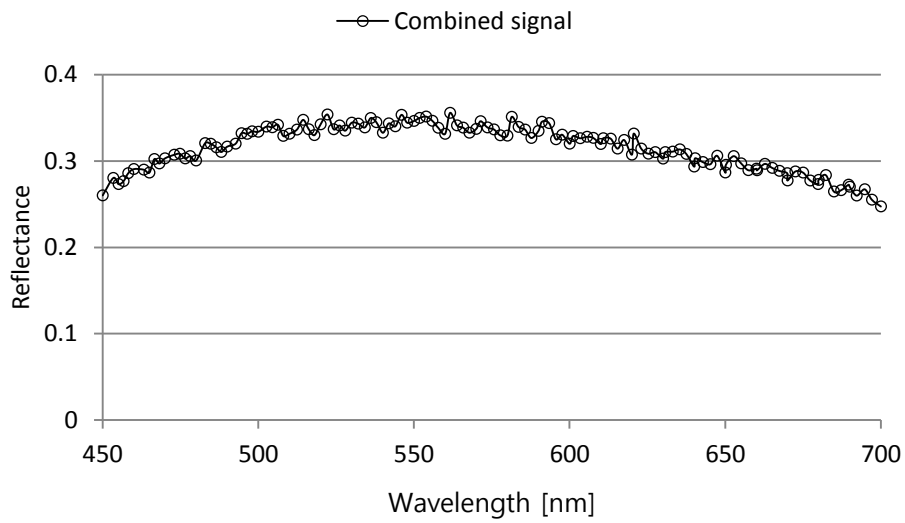
<그림 6.5 다중 반사도 신호를 통합한 최종 반사도 신호 (두께 100 nm)>



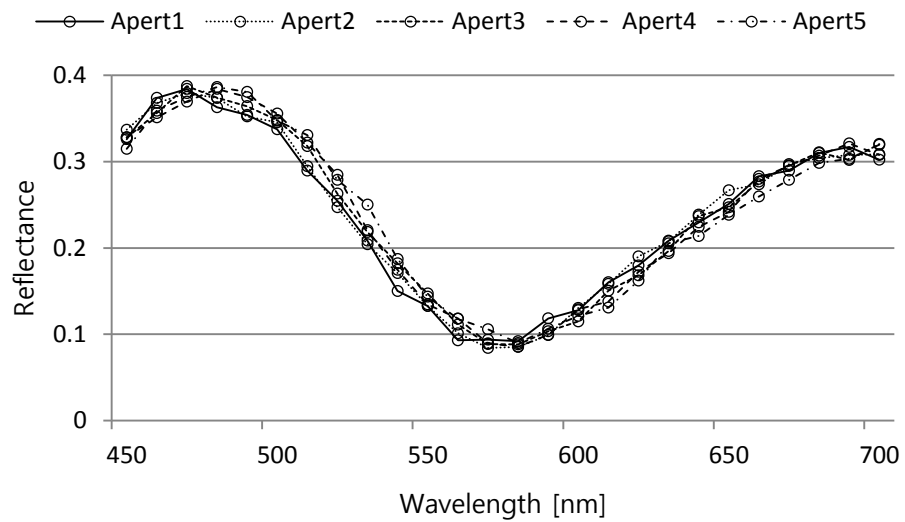
<그림 6.6 가변 조리개를 이용하여 획득된 다중 반사도 신호 (두께 200 nm)>



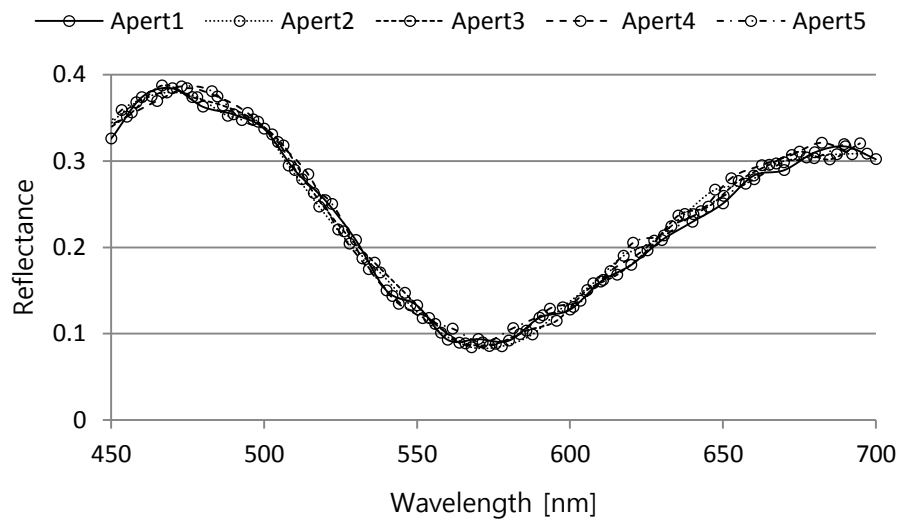
<그림 6.7 중첩된 다중 반사도 신호 (두께 200 nm)>



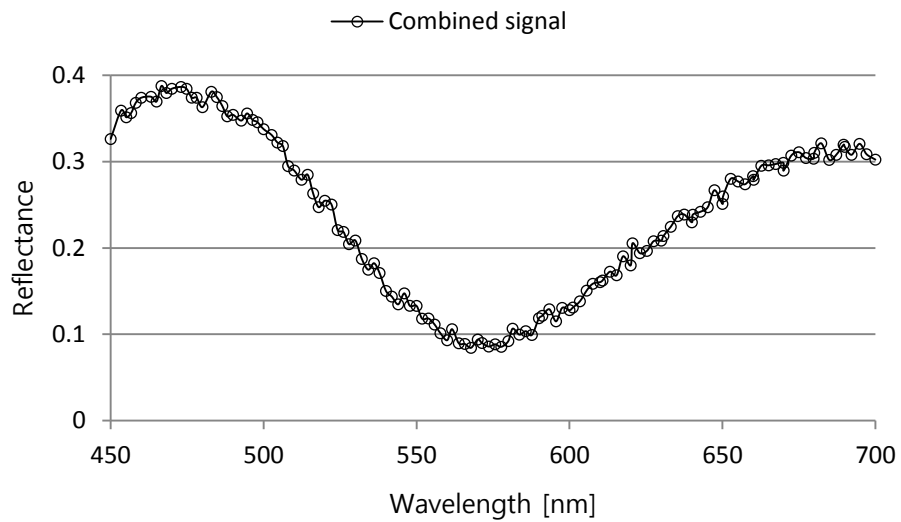
<그림 6.8 다중 반사도 신호를 통합한 최종 반사도 신호 (두께 200 nm)>



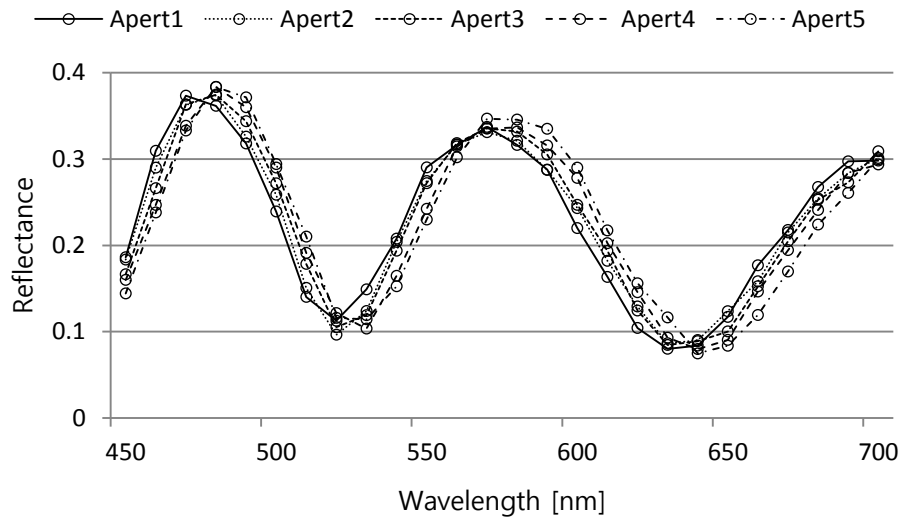
<그림 6.9 가변 조리개를 이용하여 획득된 다중 반사도 신호 (두께 500 nm)>



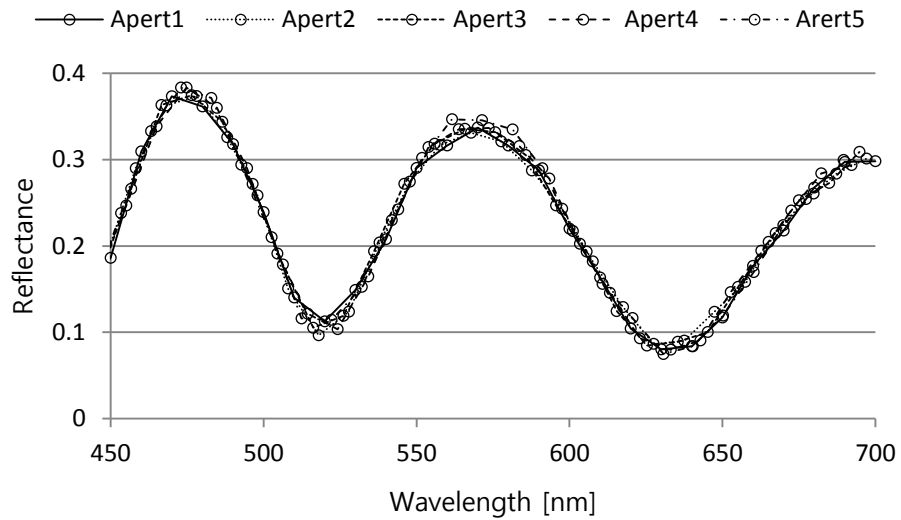
<그림 6.10 중첩된 다중 반사도 신호 (두께 500 nm)>



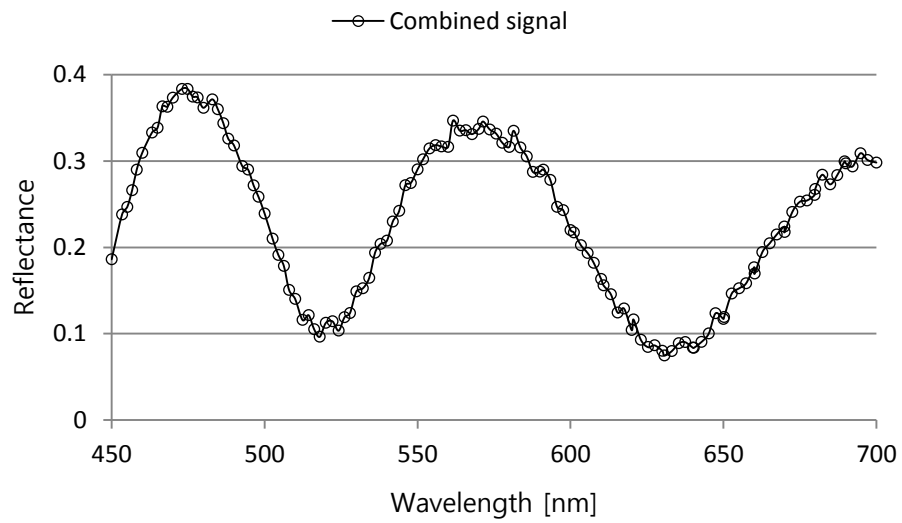
<그림 6.11 다중 반사도 신호를 통합한 최종 반사도 신호 (두께 500 nm)>



<그림 6.12 가변 조리개를 이용하여 획득된 다중 반사도 신호 (두께 1000nm)>



<그림 6.13 중첩된 다중 반사도 신호 (두께 1000 nm)>

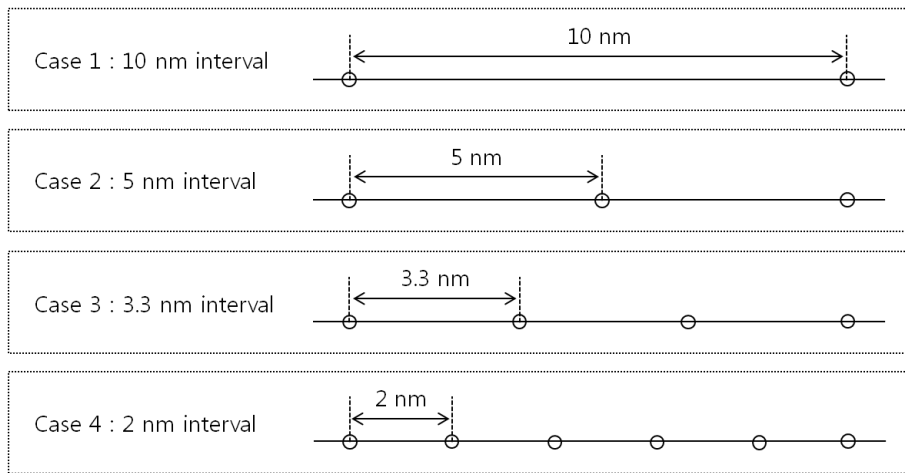


<그림 6.14 다중 반사도 신호를 통합한 최종 반사도 신호 (두께 1000 nm)>

6.3. 파장 분해능에 따른 반복도 평가

본 절에서는 다양한 두께를 갖는 측정 대상에 대해 반복 측정을 진행하여 다중 반사도 신호의 중첩을 통해 개선된 파장 측 분해능이 반복도에 미치는 영향을 살펴보고자 한다.

<그림 6.15> 는 획득된 총 5개의 다중 반사도 신호의 전체 또는 일부를 선정하여 구성 가능한 여러 파장 분해능을 나타낸다. 1 개의 반사도 신호만을 사용하여 10 nm 의 파장 분해능을 얻는 경우에서부터 5 개의 반사도 신호 전부를 사용하여 2 nm 의 파장 분해능을 얻는 경우까지 총 4 가지 경우에 대해 반복 측정시의 반복도를 관찰하였다. <표 6.2> - <표 6.5> 는 각각 Si 기판 상 두께 100 nm, 200 nm, 500 nm, 1000 nm SiO₂ 박막이 형성되어 있는 시편에 대해 얻어진 파장 분해능에 따른 반복도 결과를 나타낸다. 모든 두께의 시편에서 파장 분해능이 증가할수록 반복 측정시의 반복도가 개선되는 것을 확인할 수 있다.



<그림 6.15 다중 반사도 선정에 따른 파장 분해능 구성>

<표 6.2 파장 분해능에 따른 반복도 실험 결과(두께 100 nm)>

Number of reflectance	1	2	3	5	Spectroscopic
Wavelength Interval [nm]	10	5	3.3	2	reflectometry
Max thickness [nm]	99.5	92.4	94.2	94.1	93.8
Min thickness [nm]	94.8	88.6	91.7	91.8	92.8
Average thickness [nm]	97.1	90.2	92.8	92.8	93.5
3 STDEV [nm]	5.0	3.2	2.5	2.0	0.9

<표 6.3 파장 분해능에 따른 반복도 실험 결과(두께 200 nm)>

Number of reflectance	1	2	3	5	Spectroscopic reflectometry
Wavelength Interval [nm]	10	5	3.3	2	
Max thickness [nm]	198.7	192.1	193.5	193.4	193.3
Min thickness [nm]	194.3	189.2	191.3	191.3	193.0
Average thickness [nm]	196.4	190.8	192.3	192.5	193.1
3 STDEV [nm]	4.1	2.6	2.0	2.2	0.4

<표 6.4 파장 분해능에 따른 반복도 실험 결과(두께 500 nm)>

Number of reflectance	1	2	3	5	Spectroscopic reflectometry
Wavelength Interval [nm]	10	5	3.3	2	
Max thickness [nm]	485.2	477.3	480.0	479.9	479.7
Min thickness [nm]	482.8	475.9	478.9	478.8	479.3
Average thickness [nm]	484.1	476.7	479.4	479.2	479.6
3 STDEV [nm]	2.5	1.4	1.2	1.0	0.4

<표 6.5 파장 분해능에 따른 반복도 실험 결과(두께 1000 nm)>

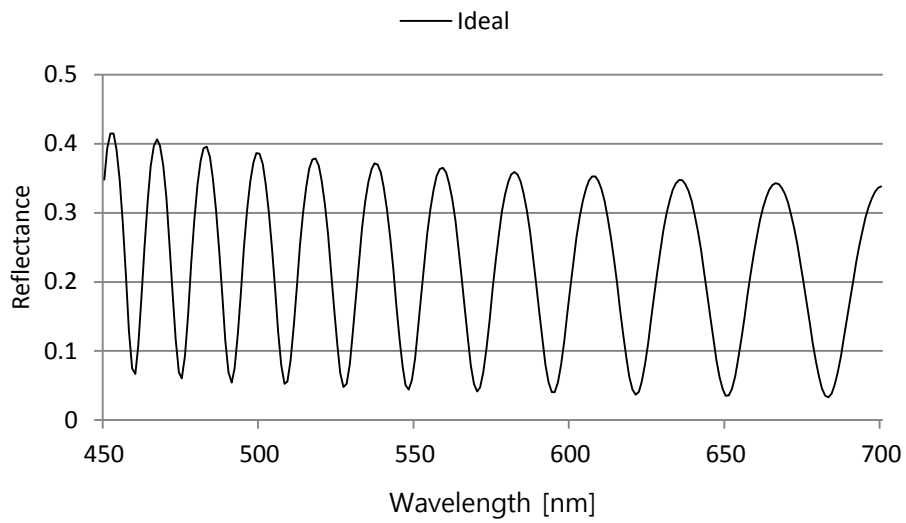
Number of reflectance	1	2	3	5	Spectroscopic reflectometry
Wavelength Interval [nm]	10	5	3.3	2	
Max thickness [nm]	972.0	965.5	968.3	969.0	966.9
Min thickness [nm]	970.3	964.4	967.5	968.3	966.1
Average thickness [nm]	971.2	965.1	967.8	968.7	966.6
3 STDEV [nm]	1.5	1.1	0.8	0.7	0.7

6.4. 파장 분해능에 따른 후막 두께 측정 성능 평가

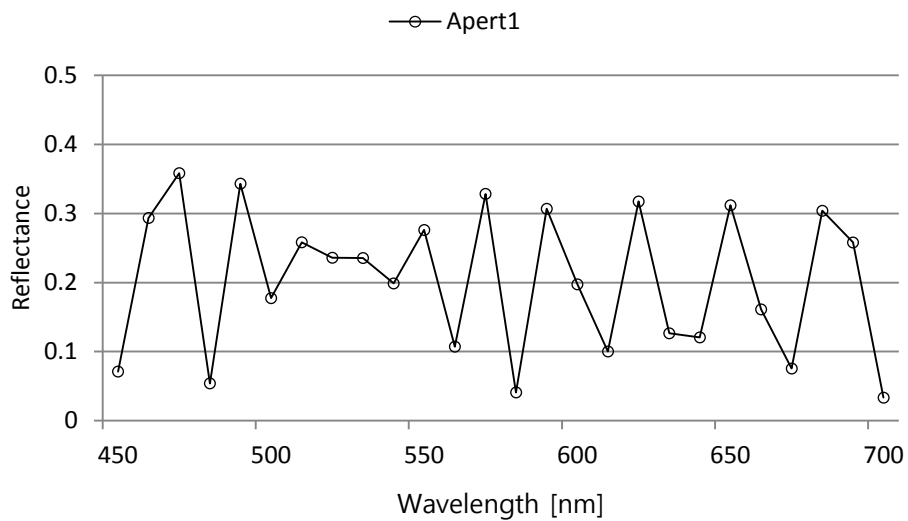
본 절에서는 두꺼운 두께를 갖는 측정 대상에 대해 측정을 진행하여 다중 반사도 신호의 중첩을 통해 개선된 파장 측 분해능이 후막 측정에 미치는 영향을 살펴보고자 한다.

<그림 6.16> 은 Si 기판 상 두께 4100 nm PR (Photo Resist) 박막이 형성되어 있는 경우 모델링된 파장 별 반사도 신호를 나타낸다. 비교적 두꺼운 두께에 해당되므로 그림에서와 같이 반사도 신호의 최고, 최저점이 많은 고주파의 형상을 보이는 것을 알 수 있다. <그림 6.17> - <그림 6.21> 은 Si 기판 상 두께 4100 nm PR 박막이 형성되어 있는 시편에 대해 5 개의 가변 조리개 직경에서 얻어진 다중 반사도 신호를 나타낸다. 서로 다른 입사각을 갖는 각각의 반사도 신호는 전체적인 반사도 신호의 형상에서는 차이를 보이지만 공통적으로 샘플링이 부족해 반사도 신호가 정확하게 얻어지지 못하고 왜곡이 발생한 것을 알 수 있다.

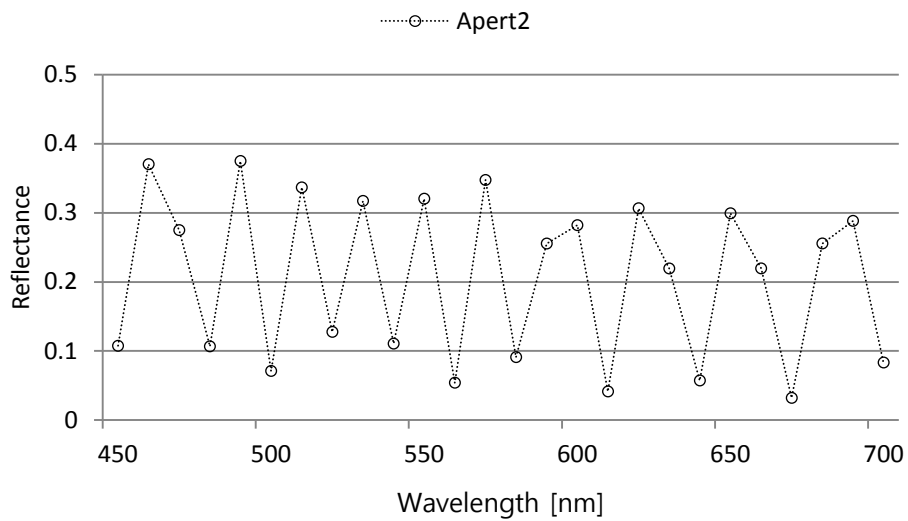
<그림 6. 22> 는 얻어진 다중 반사도 신호에 수학적으로 계산된 파장 측 오프셋을 보상하여 다중 반사도 신호를 중첩시킨 결과이다. 마지막으로 <그림 6.23> 는 중첩된 다중 반사도 신호를 통합하여 하나의 반사도 신호를 구성한 최종 반사도 신호이다. 기존 반사도 신호의 경우 샘플링이 부족해 왜곡이 발생했지만 다중 반사도 신호 중첩을 통해 파장 측 분해능이 개선되어 <그림 6.16> 의 이상적인 반사도 신호에 가까운 결과를 확인할 수 있다.



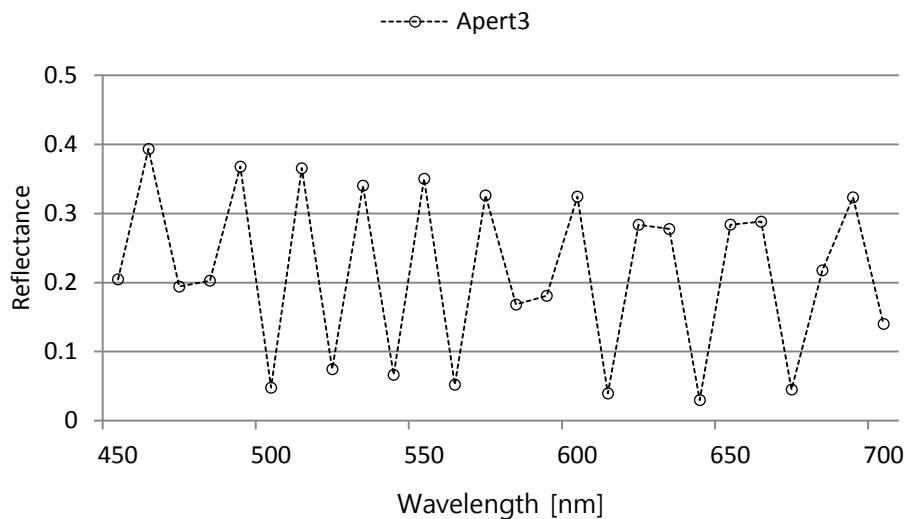
<그림 6.16 모델링된 반사도 신호 (PR 4100nm)>



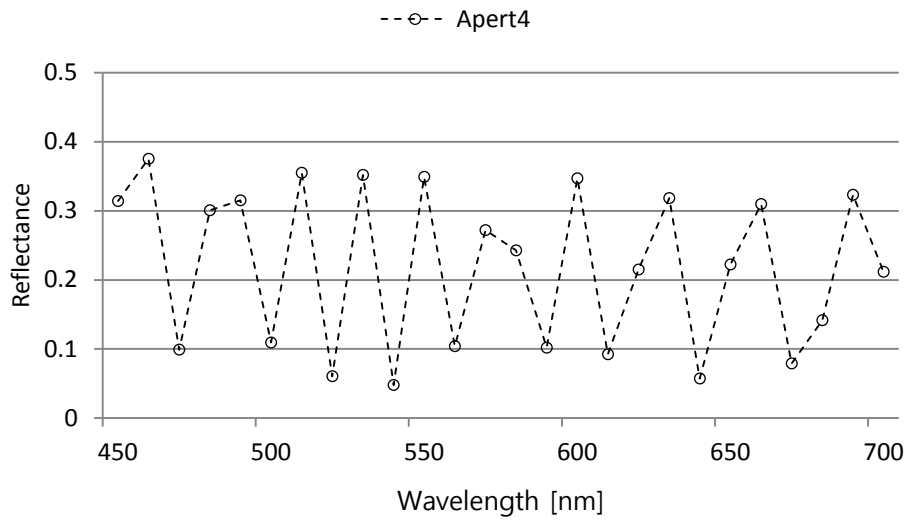
<그림 6.17 PR 4100nm 시편 측정 결과 반사도 신호 (입사각 21°)>



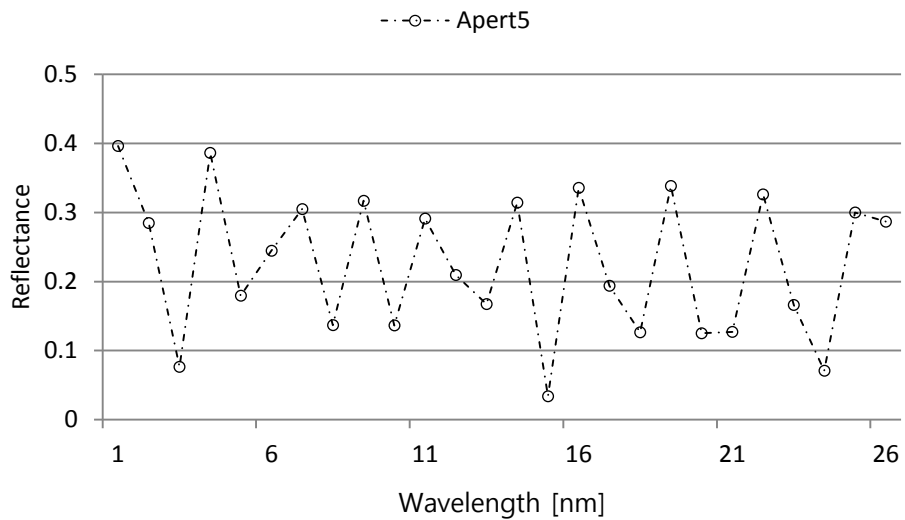
<그림 6. 18 PR 4100nm 시편 측정 결과 반사도 신호 (입사각 19.2°)>



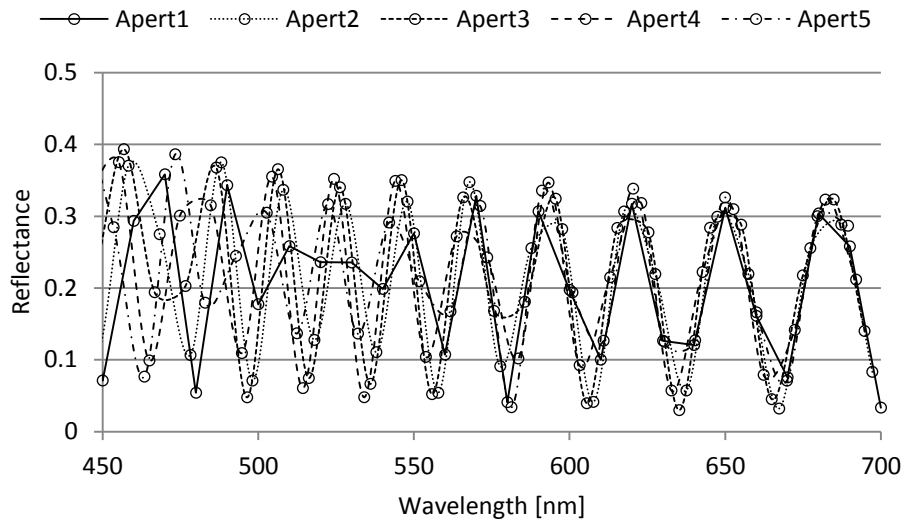
<그림 6. 19 PR 4100nm 시편 측정 결과 반사도 신호 (입사각 17.4°)>



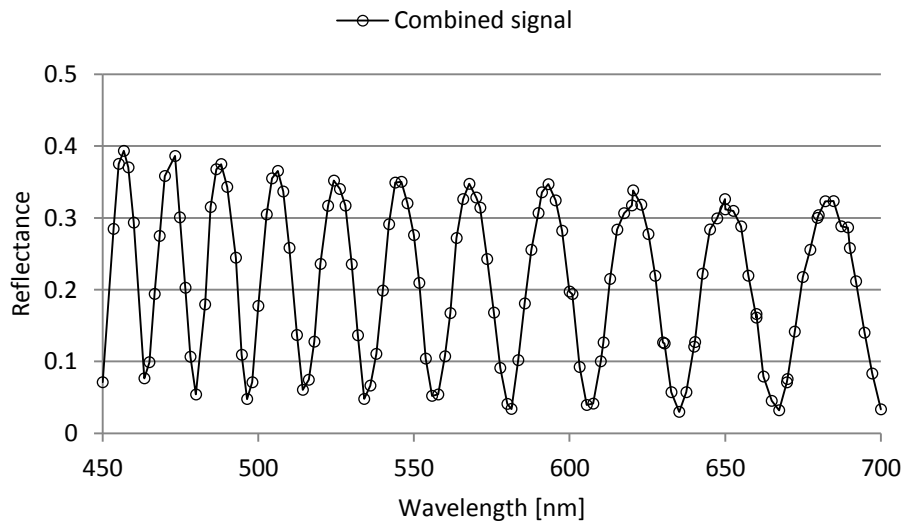
<그림 6. 20 PR 4100nm 시편 측정 결과 반사도 신호 (입사각 15.3°)>



<그림 6. 21 PR 4100nm 시편 측정 결과 반사도 신호 (입사각 12.9°)>



<그림 6.22 중첩된 다중 반사도 신호 (PR 4100 nm)>



<그림 6.23 다중 반사도 신호를 통합한 최종 반사도 신호 (PR 4100 nm)>

7. 결론

본 연구에서는 투명 박막의 두께 형상을 안정적으로 측정하기 위한 목적으로 다중 반사도 중첩법을 이미징 분광 반사계에 적용하였다. 다중 반사도 중첩법에서는 강건성이 뛰어난 회전형 필터를 기반으로 가변 조리개를 이용하여 얻어진 여러 반사도 신호를 중첩하는 방법을 통해 파장 분해능을 개선하게 된다.

모의 실험을 수행하여 기존의 이미징 분광 반사계 시스템이 갖는 한계를 분석하였다. 시스템의 파장 분해능이 낮아짐에 따라 반복 측정시의 반복도가 나빠지고 측정 가능한 박막 두께의 범위가 제한적임을 보였다.

파장 분해능을 개선하기 위한 목적으로 다중 반사도 중첩법을 제안하였다. 수학적 모델을 이용하여 총 반사 계수의 크기와 위상이 빛의 입사각에 대한 함수이며 서로 다른 입사각에서 파장 축 평행 이동이 발생함을 확인하였다. 입사각 별 위상 차로부터 파장 축 오프셋을 구하고 이를 반사도 신호에 적용시켜 다중 반사도 신호를 중첩하는 방법으로 파장 분해능의 개선이 가능함을 보였다. 서로 다른 입사각을 유도하기 위한 방법으로 가변 조리개가 사용되었으며 조리개의 기하학적 구조와 파장 축 오프셋 간의 관계를 분석하였다.

중첩되는 반사도 신호의 개수에 따른 이미징 분광 반사계의 성능 개선을 모의 실험을 통해 분석하여 시스템 최적화를 진행하였다. 중첩에 이용되는 반사도 신호의 개수를 증가시키는 방법으로 파장 분해능 및 측정 성능이 개선됨을 확인하였으며 최적의 반복도 성능을 보여주는 파장 분해능을 기준으로 다중 반사도 신호를 구성하였다.

실험을 위해 이미징 분광 반사계 시스템을 구성하였다. 시스템은 광원, 회전형 필터, 광학계 및 대물 렌즈, 가변 조리개, CCD 카메라 등으로 구성되었다. 최적화를 통해 구성된 다중 반사도 신호를 획득하기 위한 가변 조리개를 적절하게 설계하여 이미징 분광 반사계에 적용하였다.

제안된 방법이 측정 성능에 미치는 영향을 평가하는 실험을 수행하였다. 구성된 이미징 분광 반사계 시스템을 이용하여 서로 다른 입사각을 갖는 다중 반사도 신호를 획득하고 다중 반사도 신호의 중첩을 통해 파장 분해능이 개선됨을 확인하였다. 또한 파장 분해능의 개선에 따른 반복도 향상 및 측정 가능한 박막 두께 범위가 확장 가능함을 확인하였다.

결과적으로 강건성과 파장 분해능이 상충하는 특성이 있었던 기존의 이미징 분광 반사계 시스템과는 달리 측정 성능이 우수하면서도 실제 공정에서 활용 가능한 시스템을 구현하였다. 제안된 방법의 적용을 통해 반도체 및 디스플레이 제조 공정을 보다 안정적으로 관리할 수 있을 것으로 기대된다.

References

- [1] P. Carre. "Installation et utilisation du comparateur photoélectrique et interférentiel du Bureau International des Poids et Mesures." *Metrologia* 2.1 (1966): 13.
- [2] de Groot, Peter, and Leslie Deck. "Three-dimensional imaging by sub-Nyquist sampling of white-light interferograms." *Optics letters* 18.17 (1993): 1462-1464.
- [3] de Groot, Peter, and Leslie Deck. "Surface profiling by analysis of white-light interferograms in the spatial frequency domain." *Journal of modern optics* 42.2 (1995): 389-401.
- [4] Sandoz, Patrick. "Wavelet transform as a processing tool in white-light interferometry." *Optics Letters* 22.14 (1997): 1065-1067.
- [5] 안우정. "백색광 위상 천이 간섭계에서의 위상 오차의 수치해석 보정". 박사학위논문, 서울대학교 대학원 (2005).
- [6] 한건수. "광위상간섭법에서 기준위상의 수치해석 보정". 박사학위논문, 한국과학기술원 (1994).
- [7] Deck, Leslie, and Peter De Groot. "High-speed noncontact profiler based on scanning white-light interferometry." *Applied optics* 33.31 (1994): 7334-7338.
- [8] Sandoz, Patrick. "An algorithm for profilometry by white-light phase-shifting interferometry." *Journal of Modern Optics* 43.8 (1996): 1545-1554.
- [9] 강민구. "백색광 주사 간섭계를 이용한 표면 형상 측정 알고리즘에 관한 연구". 박사학위논문, 한국과학기술원 (1999).

- [10] Caber, Paul J. "Interferometric profiler for rough surfaces." *Applied optics* 32.19 (1993): 3438-3441.
- [11] Kino, Gordon S., and Stanley SC Chim. "Mirau correlation microscope." *Applied Optics* 29.26 (1990): 3775-3783.
- [12] Chim, Stanley SC, and Gordon S. Kino. "Three-dimensional image realization in interference microscopy." *Applied Optics* 31.14 (1992): 2550-2553.
- [13] Larkin, Kieran G. "Efficient nonlinear algorithm for envelope detection in white light interferometry." *JOSA A* 13.4 (1996): 832-843.
- [14] Olszak, Artur, and Joanna Schmit. "High-stability white-light interferometry with reference signal for real-time correction of scanning errors." *Optical Engineering* 42.1 (2003): 54-59.
- [15] Danielson, Bruce L., and C. Y. Boisrobert. "Absolute optical ranging using low coherence interferometry." *Applied Optics* 30.21 (1991): 2975-2979.
- [16] Kim, Seung-Woo, and Gee-Hong Kim. "Thickness-profile measurement of transparent thin-film layers by white-light scanning interferometry." *Applied Optics* 38.28 (1999): 5968-5973.
- [17] 김민수. “백색광 간섭계를 이용한 표면 형상과 박막 두께의 동시 측정에 관한 연구”. 박사학위논문, 서울대학교 대학원 (2017).
- [18] Schnell, U., E. Zimmermann, and R. Dandliker. "Absolute distance measurement with synchronously sampled white-light channelled spectrum interferometry." *Pure and Applied Optics: Journal of the European Optical Society Part A* 4.5 (1995): 643.

- [19] Schnell, U., S. Gray, and R. Dändliker. "Dispersive white-light interferometry for absolute distance measurement with dielectric multilayer systems on the target." *Optics Letters* 21.7 (1996): 528-530.
- [20] Kuwamura, Susumu, and Ichirou Yamaguchi. "Wavelength scanning profilometry for real-time surface shape measurement." *Applied optics* 36.19 (1997): 4473-4482.
- [21] Xiaoli, Dai, and Seta Katuo. "High-accuracy absolute distance measurement by means of wavelength scanning heterodyne interferometry." *Measurement Science and Technology* 9.7 (1998): 1031.
- [22] Hlubina, Petr. "Dispersive white-light spectral interferometry to measure distances and displacements." *Optics communications* 212.1 (2002): 65-70.
- [23] Joo, Ki-Nam, and Seung-Woo Kim. "Absolute distance measurement by dispersive interferometry using a femtosecond pulse laser." *Optics express* 14.13 (2006): 5954-5960.
- [24] Hlubina, Petr, Dalibor Ciprian, and Jiří Luňáček. "Dispersive white-light spectral interferometry including the effect of thin-film for distance measurement." *Optik-International Journal for Light and Electron Optics* 118.7 (2007): 319-324.
- [25] Kim, Dae-Suk, and Yong-Jai Cho. "3-D surface profile measurement using an acousto-optic tunable filter based spectral phase shifting technique." *Journal of the Optical Society of Korea* 12.4 (2008): 281-287.
- [26] Sasaki, Osami, *et al.* "Sinusoidal wavelength-scanning interferometric reflectometry." *Optical Engineering for Sensing and Nanotechnology (ICOSN'99)*. International Society for Optics and Photonics, 1999.

- [27] Akiyama, Hisashi, Osami Sasaki, and Takamasa Suzuki. "Thickness and surface profile measurement by a sinusoidal wavelength-scanning interferometer." *Optical review* 12.4 (2005): 319-323.
- [28] Hlubina, Petr, *et al.* "Dispersive white-light spectral interferometry with absolute phase retrieval to measure thin film." *Optics express* 14.17 (2006): 7678-7685.
- [29] Hlubina, Petr, *et al.* "Spectral interferometry and reflectometry used to measure thin films." *Applied Physics B* 92.2 (2008): 203-207.
- [30] Debnath, Sanjit Kumar, Joonho You, and Seung-Woo Kim. "Determination of film thickness and surface profile using reflectometry and spectrally resolved phase shifting interferometry." *International Journal of Precision Engineering and Manufacturing* 10.5 (2009): 5-10.
- [31] Kim, Daesuk, *et al.* "Measurement of the thickness profile of a transparent thin film deposited upon a pattern structure with an acousto-optic tunablefilter." *Optics letters* 27.21 (2002): 1893-1895.
- [32] Kim, Daesuk, and Soohyun Kim. "Direct spectral phase function calculation for dispersive interferometric thickness profilometry." *Optics express* 12.21 (2004): 5117-5124.
- [33] Ghim, Young-Sik, and Seung-Woo Kim. "Thin-film thickness profile and its refractive index measurements by dispersive white-light interferometry." *Optics express* 14.24 (2006): 11885-11891.
- [34] Ghim, Young-Sik, and Seung-Woo Kim. "Fast, precise, tomographic measurements of thin films." *Applied Physics Letters* 91.9 (2007): 091903.

- [35] Gao, Feng, Hussam Muhamedsalih, and Xiangqian Jiang. "Surface and thickness measurement of a transparent film using wavelength scanning interferometry." *Optics express* 20.19 (2012): 21450-21456.
- [36] 황영민. "Wavelet 변환을 이용한 파장 주사 간섭계에서의 박막 두께 형상 측정". 박사학위논문, 서울대학교 대학원 (2005).
- [37] Ohlídal, Ivan. "Immersion spectroscopic reflectometry of multilayer systems. I. Theory." *JOSA A* 5.4 (1988): 459-464.
- [38] Maddaloni, Pasquale, *et al.* "Thickness measurement of thin transparent plates with a broad-band wavelength scanning interferometer." *Photonics Technology Letters, IEEE* 16.5 (2004): 1349-1351.
- [39] Benson, Tyrone E., *et al.* "In-situ spectroscopic reflectometry for polycrystalline silicon thin film etch rate determination during reactive ion etching." *Journal of electronic materials* 25.6 (1996): 955-964.
- [40] Özder, Serhat, *et al.* "Determination of the refractive index dispersion of thick films by continuous wavelet transform." *Thin solid films* 458.1 (2004): 257-262.
- [41] Kim, Daesuk, *et al.* "Fast thickness profile measurement using a peak detection method based on an acousto-optic tunable filter." *Measurement Science and Technology* 13.7 (2002): L1.
- [42] Ghim, Young-Sik, Amit Suratkar, and Angela Davies. "Reflectometry-based wavelength scanning interferometry for thickness measurements of very thin wafers." *Optics express* 18.7 (2010): 6522-6529.

- [43] 조태영. “투명 박막의 입체 형상 측정을 위한 광학 변조 필터 채용 분광 광도계 개발”. 박사학위논문, 서울대학교 대학원 (2013).
- [44] 김광락. “선형가변필터와 CCD 카메라를 이용한 투명박막의 두께형상 측정”. 석사학위논문, 서울대학교 대학원 (2009).
- [45] Kim, Kwangrak, *et al.* "Volumetric thin film thickness measurement using spectroscopic imaging reflectometer and compensation of reflectance modeling error." *International Journal of Precision Engineering and Manufacturing* 15.9 (2014): 1817-1822.
- [46] 김광락. “위상 추출법과 이미징 분광 반사계를 이용한 박막 두께 형상 측정”. 박사학위논문, 서울대학교 대학원 (2015).
- [47] Tompkins, Harland G., and William A. McGahan. *Spectroscopic ellipsometry and reflectometry: a user's guide*. New York: Wiley, 1999.
- [48] 안일신. "엘립소메트리" 한양대학교 출판부 (2000): 49-54.
- [49] Fujiwara, Hiroyuki. *Spectroscopic ellipsometry: principles and applications*. John Wiley & Sons, 2007.
- [50] Zhan, Qiwen, and James R. Leger. "High-resolution imaging ellipsometer." *Applied optics* 41.22 (2002): 4443-4450.
- [51] Jin, Gang, Roger Jansson, and Hans Arwin. "Imaging ellipsometry revisited: developments for visualization of thin transparent layers on silicon substrates." *Review of scientific instruments* 67.8 (1996): 2930-2936.

[52] Chou, Chien, *et al.* "Polarization modulation imaging ellipsometry for thin film thickness measurement." *Optics communications* 273.1 (2007): 74-83.

[53] Han, Chien-Yuan, and Yu-Faye Chao. "Photoelastic modulated imaging ellipsometry by stroboscopic illumination technique." *Review of scientific instruments* 77.2 (2006): 023107.

[54] Motulsky, Harvey J., and Lennart A. Ransnas. "Fitting curves to data using nonlinear regression: a practical and nonmathematical review." *The FASEB journal* 1.5 (1987): 365-374.

Appendices

A. 총 반사계수의 유도

총 반사계수는 <그림 2.1> 에서와 같이 박막 내부에서 다중반사를 거치며 공기중으로 빠져 나오는 모든 빛을 합한 것과 같다. 수식적으로는 식 (2.4 a) – (2.4 d) 와 같이 규칙적인 형태를 가지며 만들어지는 시리즈를 모두 더한 것과 같다. 이는 식 (A.1) 과 같이 쓸 수 있다. 또한 식 (A.1) 에서 우변의 두 번째 항 이후로는 동일한 형태로 시리즈가 반복되므로 이를 정리하면 식 (A.2) 와 같다.

$$\begin{aligned}
 r_{total} = & r_{12} + \\
 & t_{12} \cdot r_{23} \cdot t_{21} e^{-i2\beta} + \\
 & t_{12} \cdot r_{23}^2 \cdot r_{21} \cdot t_{21} e^{-i4\beta} + \\
 & t_{12} \cdot r_{23}^3 \cdot r_{21}^2 \cdot t_{21} e^{-i6\beta} + \dots
 \end{aligned} \tag{A.1}$$

$$r_{total} = r_{12} + t_{12} t_{21} r_{23} e^{-i2\beta} \left[1 + (r_{21} r_{23} e^{-i2\beta}) + (r_{21} r_{23} e^{-i2\beta})^2 + (r_{21} r_{23} e^{-i2\beta})^3 + \dots \right] \tag{A.2}$$

정리된 총 반사계수의 식 (A.2) 는 규칙적인 형태를 가지며 지수항이 반복되고 있음을 알 수 있다. 따라서 아래의 식 (A.3) 의 관계를 이용하여 식 (A.2) 의 우변의 시리즈를 정리할 수 있음을 알 수 있다. 이를 대입하여 정리하면 식 (A.4) 과 같다.

$$\frac{1}{1-x} = 1 + x + x^2 + x^3 + \dots \quad (\text{A.3})$$

$$r_{total} = r_{12} + \frac{t_{12}t_{21}r_{23}e^{-i2\beta}}{1 - r_{21}r_{23}e^{-i2\beta}} \quad (\text{A.4})$$

프레넬 반사 계수와 투과 계수는 식 (A.5) 와 같은 성질을 가지므로, 이 성질을 이용하여 식 (A.4) 를 변형할 수 있다. 최종적으로 식 (2.6) 과 동일한 형태의 총 반사계수를 식 (A.6) 과 같이 얻을 수 있다.

$$\begin{aligned} r_{ba} &= -r_{ab} \\ t_{ba} &= \frac{1 - r_{ab}^2}{t_{ab}} \end{aligned} \quad (\text{A.5})$$

$$r_{total} = \frac{r_{12} + r_{23} \exp(-i2\beta)}{1 + r_{12}r_{23} \exp(-i2\beta)} \quad (\text{A.6})$$

B 빛의 편광 상태에 따른 반사계수

프레넬의 반사 계수 및 투과 계수는 빛의 편광 상태에 따라 다르게 나타남을 이미 식 (2.3 a-d) 을 통해서 확인한 바 있다. 따라서 본 논문에서 수식을 전개할 때 사용한 프레넬 반사 계수 r_{12} 및 r_{23} 의 경우 엄밀하게는 빛의 편광 상태에 따라 P 파와 S 파를 구분하여 사용해야 하며, 편광 상태에 따라 반사도 역시 달라지는 것이 일반적이다. 그러나 본 논문에서 사용된 시스템에 한하여 다음과 같이 가정하였고, 본문에서는 P 파와 S 파의 구분 없이 이론을 전개하였다.

B.1 수직 입사하는 경우

시뮬레이션에서는 빛이 수직 입사되는 환경을 가정하였다. 빛이 수직 입사되는 경우 θ_1 와 θ_2 는 모두 그 값이 0 이므로 이를 대입하여 식을 다시 쓰면 식 (C.1 a-c) 와 같다. 투과 계수의 경우 P 파와 S 파가 동일한 값을 가지며, 반사 계수의 경우 서로 부호가 바뀌는 것을 확인할 수 있다. 이 값들을 각각 P 파와 S 파에 대해서 따로 반사도를 구해 보면 동일한 반사도 값을 가지는 것을 알 수 있다. 즉, 수직 입사되는 경우를 가정하면 P 파 또는 S 파에 대한 수식 중 어떤 것을 적용해도 동일한 반사도 값을 얻을 수 있다. 이에 따라 이 논문에서 수식을 전개할 때 P 파와 S 파의 구분 없이 표기하였다.

$$r_{12}^p = \frac{N_2 - N_1}{N_2 + N_1} \quad (\text{C.1 a})$$

$$r_{12}^s = \frac{N_1 - N_2}{N_1 + N_2} \quad (\text{C.1 b})$$

$$t_{12}^p = t_{12}^s = \frac{2N_1}{N_2 + N_1} \quad (\text{C.1 c})$$

B.2 대물렌즈를 사용한 경우

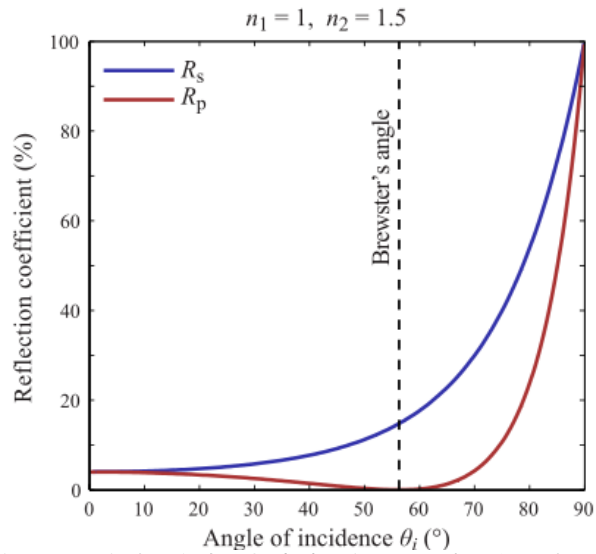
실제 실험 과정에서는 대물 렌즈를 사용한 광학 시스템을 구성하였기 때문에 이를 고려해야 한다. 일반적으로 광학계에서 대물 렌즈를 이용할 경우 렌즈의 NA 에 의하여 빛이 수직 입사되지 않고 각도 성분을 가지게 된다. 이 경우는 P 파와 S 파에 대한 프레넬 반사 계수가 입사각에 의하여 서로 다른 값을 가지게 되므로, 최종적으로 반사도 역시 P 파와 S 파가 서로 다르게 된다. 아래의 <그림 B.1> 은 입사각에 따른 P 파와 S 파의 반사 계수를 그래프로 표시한 것이다. 서로 다른 반사 계수를 가짐을 확인할 수 있다. P 파와 S 파에 대한 총 반사계수는 각각의 프레넬 반사 계수를 이용하여 식 (B.2 a) - (B.2 b) 와 같이 계산된다.

$$r^p = \frac{r_{12}^p + r_{23}^p \exp(-i2\beta)}{1 + r_{12}^p r_{23}^p \exp(-i2\beta)} \quad (\text{B.2 a})$$

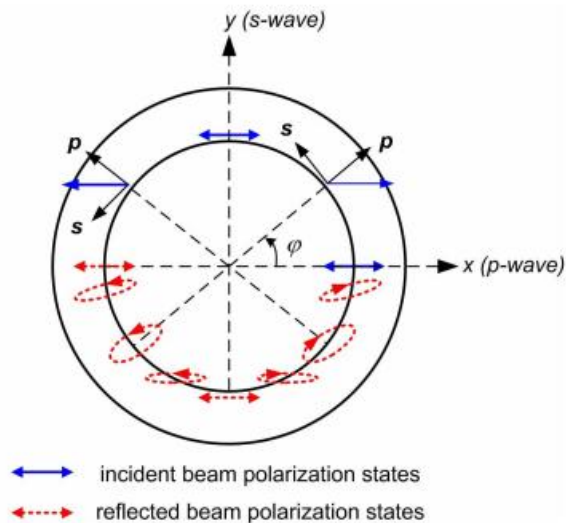
$$r^s = \frac{r_{12}^s + r_{23}^s \exp(-i2\beta)}{1 + r_{12}^s r_{23}^s \exp(-i2\beta)} \quad (\text{B.2 b})$$

실험 장치에서 빛은 선형 편광 상태로 대물 렌즈에 입사되는데 해당 조건에서 빛은 <그림 B.2> 과 같이 방위각(Azimuth Angle)을 따라 P 파와 S 파의 성분이 동등한 비율로 만들어진다. 따라서 최종적으로 얻는 반사도는 동일한 비율의 P 파와 S 파가 혼합되어 있는 결과물이라고 볼 수 있다. 이 경우의 프레넬 반사 계수는 식 (B.3) 에 의하여 정의될 수 있다.

$$\begin{aligned} r_{12} &= \frac{r_{12}^p + r_{12}^s}{2} \\ r_{23} &= \frac{r_{23}^p + r_{23}^s}{2} \end{aligned} \quad (\text{B.3})$$



<그림 B. 1 빛의 편광 상태에 따른 반사 계수의 변화>³



<그림 B. 2 대물렌즈의 방위각에 따른 P파와 S파의 구분>⁴

³ http://en.wikipedia.org/wiki/Fresnel_equations

⁴ Ye, Sang-Heon, et al. "Angle-resolved annular data acquisition method for microellipsometry." *Optics express* 15.26 (2007): 18056-18065.

Abstract

Improvement of wavelength resolution in Imaging Spectroscopic Reflectometer using rotating-type filter and tunable aperture

Due to the rapid progress of manufacturing technology, complex patterns emerged as important and critical components to meet the packaging and performance requirements of various devices. Therefore, our intention is not simply to measure thickness of a single spot, as is usually done in spectroscopic reflectometer and ellipsometer techniques; rather, our intention is to measure the volumetric thin film thickness profile. However, conventional imaging spectroscopic reflectometer, which is extensively used for measurement of volumetric thin film thickness, has poor robustness or insufficient wavelength resolution depending on system configuration. In this research, an improved version of imaging spectroscopic reflectometer is proposed in order to enable the measurement of the volumetric thin film thickness in a more reliable way.

The limitation of the conventional imaging spectroscopic reflectometer is analyzed through simulation that can evaluate the effect of the wavelength resolution on measurement performance. Multi-reflectance method using rotating-type filter and tunable aperture is proposed for the purpose of improving the wavelength resolution. The wavelength resolution can be improved by synchronizing phases of the multiple reflectance signals from different incident angles induced by the tunable aperture.

Experiments were carried out to evaluate the effect of the introduction of the multi-reflectance method on measurement performance. Multiple diameters of tunable aperture were designed to induce appropriate incident angles determined through simulation. By applying the proposed method to various specimen, improved wavelength resolution and numerical advancement of the measurement performance were obtained, verifying the validity of the proposed method.

Keywords: Thin film, Volumetric thickness measurement, Imaging spectroscopic reflectometry, Rotating-type filter, Tunable aperture, Multi-reflectance method

Student No. : 2013 - 30942